



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO
EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS
DEL PINO COLORADO**

Werner Gudiel Domínguez Sánchez

Asesorado por el Dr. Edgar Virgilio Ayala Zapata

Guatemala, febrero de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO
EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS
DEL PINO COLORADO**

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

WERNER GUDIEL DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:
VOCAL II: Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III: Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO: Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

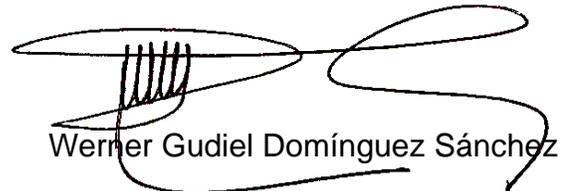
DECANO: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR: Ing. Ronald Galindo Cabrera
EXAMINADOR: Ing. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR: Ing. José Eduardo Ramírez Saravia
SECRETARIO: Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PINO COLORADO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 3 de octubre de 2005.



Werner Gudiel Domínguez Sánchez



Guatemala, 21 de noviembre de 2005.

Ingeniero
Francisco Javier Quiñones de la Cruz
Coordinador de Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Respetable Ingeniero Quiñónez

Por medio de la presente hago constar que el estudiante Werner Gudiel Domínguez Sánchez, quien se identifica con carné universitario 2000-30318, ha concluido satisfactoriamente con el trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PINO COLORADO**, dicho trabajo fue realizado en la Sección de Tecnología de Materiales y Sistemas Constructivos, CII, el cual es de suma importancia para el enriquecimiento de la investigación de la madera en Guatemala.

Sin otro particular, agradezco su atención a la presente.

Atentamente,


Dr. Ing. Virgilio Ayala Zapata
Jefe de la sección de Tecnología de Materiales y Sistemas Constructivos, CII





FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 28 de noviembre de 2 005

Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Escobar Álvarez.

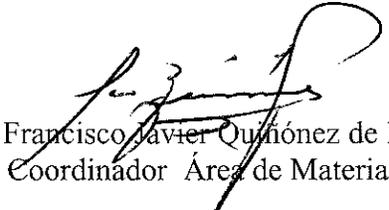
Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SECADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL PINO COLORADO**, elaborado por el estudiante universitario **Werner Gudiel Domínguez Sánchez**, quien contó con la asesoría del Doctor Ingeniero Edgar Virgilio Ayala Zapata.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **Domínguez Sánchez**, satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz
Coordinador Área de Materiales

AGRADECIMIENTOS

A:

Dios Amigo fiel, fuente inagotable de amor y sabiduría, que en todo momento a estado a mi lado compartiendo el éxito de las metas propuestas.

Mis Padres Iniciadores e impulsores de este camino por sus consejos, esfuerzos y sacrificios.

Mi Familia Inspiradores de perseverancia en la búsqueda de un futuro mejor.

Mis Amigos Por sus motivadores deseos de superación.

Toda persona Que de una u otra manera fue parte fundamental en la culminación exitosa de mi carrera y de este trabajo.

*Porque Jehová da la sabiduría,
y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia*

Prov. 2:6

DEDICATORIA

A:

Dios

Mis Padres Cástulo Dominguez Cayax y
 María Luisa Sánchez Escobar

Mis Hermanos Heivy, Edlyn y Orlando

Mis Abuelos Encarnación Dominguez y Victorina Cayax
 Rudy Sánchez y Estefina Escobar (QEPD)

Mi Familia

Mis Amigos (as)

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. PRINCIPIOS DEL PROCESO DE SECADO	1
1.1. Como se encuentra el agua en la madera	1
1.2. Contenido de humedad	2
1.3. Importancia del secado de madera	3
1.4. Velocidad del secado	4
1.5. Defectos del secado en la madera	5
1.5.1. Agrietamiento y rajadura	6
1.5.2. Colapso	8
1.5.3. Deformaciones	8
1.5.4. Manchas y mohos	10
1.6. Efectos de la humedad sobre las propiedades de la madera	11
1.6.1. Peso	11
1.6.2. Resistencia mecánica	12
1.6.3. Variaciones dimensionales	14
1.6.4. Durabilidad	15

2.	SECADO AL AIRE LIBRE	17
2.1.	Patio de secado	18
2.2.	Cimientos	19
2.3.	Apilado	20
2.3.1.	Dimensiones de la pila	21
2.3.2.	Separadores	22
2.3.3.	Separación y colocación de tablas	23
2.3.4.	Techo	23
2.3.5.	Protección de los extremos	24
2.3.6.	Escurrideras	24
2.3.7.	Sombras o parasoles	25
2.3.8.	Tablillas en los extremos	26
2.3.9.	Pintura y parafina	26
2.4.	Sistemas de apilado	28
2.4.1.	Pila plana horizontal	28
2.4.2.	Caballete	29
2.4.3.	Sistema vertical	31
2.4.4.	Sistema jaula cuadrada y triangular	32
2.4.5.	Sistema horizontal en caja	33
3.	SECADO EN HORNOS	35
3.1.	Características generales	36
3.2.	Calefacción	37
3.3.	Clasificación de los hornos	38
3.3.1.	Método de carga	38
3.3.2.	Circulación de aire	39
3.4.	Apilado y cargado del horno	40
3.5.	Tiempo de secado	42

3.6.	Muestras para el control de secado	44
3.7.	Pruebas finales de control de humedad	48
3.8.	Medidas de seguridad en hornos	53
4.	OTRAS METODOLOGÍAS	59
4.1.	Secado natural acelerado	59
4.2.	Secado en interiores	60
5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	63
5.1.	Muestras	63
5.1.1.	Obtención de muestras	63
5.1.2.	Secado de muestras	63
5.2.	Ensayos de laboratorio	64
5.2.1.	Material utilizado	64
5.2.2.	Equipo utilizado	64
5.2.3.	Descripción de ensayos	65
5.2.3.1.	Contenido de humedad	65
5.2.3.2.	Contracción radial y tangencial	66
5.2.3.3.	Peso específico	66
5.2.3.4.	Flexión estática	67
5.2.3.5.	Compresión paralela a la fibra	70
5.2.3.6.	Compresión perpendicular a la fibra	72
5.2.3.7.	Dureza	74
5.2.4.	Procedimientos de ensayos	74

6. RESULTADOS	77
6.1. Obtención de las propiedades físicas	77
6.1.1. Contenido de humedad	77
6.1.2. Contracción radial y tangencial	77
6.1.3. Peso específico	79
6.2. Obtención de propiedades mecánicas	79
6.2.1. Flexión estática	79
6.2.2. Compresión paralela a la fibra	84
6.2.3. Compresión perpendicular a la fibra	87
6.2.4. Dureza	89
6.3. Cuadro general de resultados	91
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS	101
BIBLIOGRAFÍA	103
APÉNDICES	105
ANEXOS	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Agrietamiento y rajaduras: (a) Grietas superficiales; (b) Grietas internas, rajaduras; (c) Grietas extremas	6
2	Deformaciones de madera: (a) Acanalado; (b) Combado; (c) Encorvado; (d) Revirado	9
3	Deformaciones causadas por separadores mal distribuidos.	10
4	Propiedades de Resistencia de la Madera de pino en función del contenido de humedad. 1, Tensión Paralela a las fibras; 2, Flexión Estática; 3, Compresión paralela a la fibra; 4, Compresión perpendicular a la fibra, y 5, cizalle	13
5	Propiedades de Resistencia de la Madera de pino en función del peso específico (contenido de humedad 15%). 1, Tensión paralela a las fibras; 2, Flexión Estática; 3, Compresión paralela a las fibras; 4, Dureza paralela a las fibras; 5, Dureza perpendicular a las fibras; 6, Cizalle; 7, Compresión perpendicular a las fibras, y 8, Tensión perpendicular a las fibras	14
6	Disposición del patio de secado al aire; se señala la posición de las pilas con sus avenidas de transito y circulación de aire	19
7	Colocación de los cimientos para el apilado	20
8	Colocación de escurrideras en los extremos de la pila horizontal	24
9	Colocación de sombras o parasoles en los extremos de una pila horizontal	25

10	Colocación de tablillas protectoras en los extremos de una pila horizontal	26
11	Aplicación de pintura o parafina en los extremos para su protección	27
12	Madera apilada bajo techo	28
13	Apilado horizontal o plano	29
14	Apilado en forma de caballete	30
15	Apilado sistema vertical	31
16	(a) Apilado sistema jaula cuadrada; y (b) Apilado sistema jaula triangular	33
17	Apilado sistema horizontal en caja	34
18	Obtención de muestra para control de contenido de humedad	47
19	Localización de las muestras de control de humedad en una carga	48
20	Método de corte de una sección de la tabla para determinar la distribución de humedad en la parte central y periférica	49
21	Método de corte de muestras de madera para determinar la distribución de esfuerzos	50
22	Medidas de seguridad en hornos	54
23	Medidas de seguridad en hornos	55
24	Medidas de seguridad en hornos	56
25	Medidas de seguridad en hornos	56
26	Medidas de seguridad en hornos	57
27	Secadero de calentamiento solar. (a) Vista frontal del lado sur de secadero solar de madera aserrada. (b) Vista lateral este del secadero solar de madera aserrada que muestra la puerta principal de carga y descarga y el pequeño acceso al área del colector	62
28	Ensayo de flexión estática	68
29	Varios modos de falla que se dan en la prueba de flexión estática	70
30	Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. (a) Ensayo tangencial. (b) Ensayo radial. (c) Aplicación de carga	73

31	Máquina universal de carga para ensayos de compresión y dureza	107
32	Máquina universal de carga para ensayo de flexión estática	108
33	Ensayo de flexión estática, falla en fibra cruzada y astillosa	109
34	Ensayo de flexión estática, falla en fibra cruzada	109
35	Ensayo de flexión estática, falla a tensión simple	110
36	Ensayo de flexión estática, falla a tensión astillosa	110
37	Ensayo de compresión perpendicular a la fibra	111
38	Aplicación de carga en ensayo de compresión perpendicular	111
39	Ensayo de compresión paralela a la fibra, falla por aplastamiento	112
40	Ensayo de dureza, penetración en el borde de la probeta	113
41	Ensayo de dureza, penetración radial	114
42	Gráfica carga-deformación madera verde, probeta 1	118
43	Gráfica carga-deformación madera verde, probeta 2	119
44	Gráfica carga-deformación madera seca al aire libre, probeta 1	121
45	Gráfica carga-deformación madera seca al aire libre, probeta 2	122
46	Gráfica carga-deformación madera seca en horno, probeta 1	124
47	Gráfica carga-deformación madera seca en horno, probeta 2	125

TABLAS

I	Promedio de incremento de esfuerzos al decrecer la humedad en 1%	12
II	Determinación de cargas máximas de penetración para probetas de madera verde	90
III	Determinación de cargas máximas de penetración para las probetas de madera seca al aire	90

IV	Determinación de cargas máximas de penetración para las probetas de madera secas en horno	91
V	Características físicas	91
VI	Características mecánicas	92
VII	Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera verde	117
VIII	Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera secas al aire libre	120
IX	Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera secas en horno	123

GLOSARIO

Aislamiento	Sistema o dispositivo que impide la transmisión de la electricidad, el calor, el sonido, etc.
Albura	Región externa del corazón duramen o xilema del tronco del árbol, más clara y tierna que éste, con células todavía vivas.
Contracción	Es la característica física que depende, totalmente, de los cambios de humedad en la madera, se inicia al disminuir la humedad en la madera desde el punto de saturación de la fibra y viceversa, entendido como punto de saturación en el momento en que la madera tiene solamente agua higroscópica y de constitución.
Degradación	Retroceso o empeoramiento de una asociación vegetal desde una manifestación natural superior a otra más baja, originado en general por la acción del hombre o por otros agentes bióticos. Deterioro del estado de la masa forestal, degradación del bosque, degradación del suelo boscoso, degradación del suelo, debido por ejemplo a la extracción de hojarasca, emisiones, manejo forestal inadecuado, etc.

Deshumidificación	Acción de quitar la humedad
Dilatación	Aumento de longitud, superficie o volumen de un cuerpo por separación de sus moléculas con disminución de su densidad.
Duramen	Porción del cilindro central, constituida por las capas internas del leño; en el árbol en crecimiento. Dicha porción no contiene células vivas y los materiales de reserva que en ella existían, v.gr., almidón, han sido retirados o convertidos en sustancias propias del duramen. El duramen, por lo general, es de color más oscuro que la albura, aunque la diferencia puede no ser siempre distinguible. Leño intermedio. Sinónimo: Corazón, término popular.
Esfuerzo máximo	Carga máxima por unidad de área que resiste un cuerpo antes de llegar a la falla.
Evaporación	Paso del estado líquido al estado de vapor.
Flexibilidad	Capacidad de un cuerpo de doblarse y recuperar su forma original.
Fuste	Parte sólida de los árboles.
Impermeabilizante	Sustancia que, al endurecer, forma una película impermeable sobre la superficie de un cuerpo.

Límite de elasticidad	Punto más allá del cual resulta imposible aumentar la carga sin producir una deformación permanente.
Límite de proporcionalidad	Punto hasta el cual la deformación es proporcional a la carga.
Modulo de elasticidad	Expresa la relación existente entre la carga y la deformación dentro del límite de proporcionalidad.
Nativo (a)	Autóctono, indígena.
Ósmosis	Paso de disolvente pero no de soluto entre dos disoluciones de distinta concentración separadas por una membrana semipermeable
Peso específico	Aplicado a la madera, relación entre el peso de una muestra desecada en cámara y el de un volumen de agua igual al de la muestra con un cierto grado de humedad, según se trate de madera verde, desecada al aire o desecada en cámara.
Pila	Conjunto de cosas colocadas unas sobre otras.
Preservante	Producto químico o mezcla de productos que aplicados en la dosis y forma adecuada, protegen a la madera contra uno o varios agentes destructores.

Receptáculo	Base que sirve de asiento a las diversas pertenencias florales y a las diversas flores de una inflorescencia en capítulo, en umbela, en cima o en espádice
Rigidez	Capacidad de resistir la dobladura
Savia	Agua que contiene una madera verde y todas las sustancias que lleva en disolución o suspensión. Para los fines del secado la savia se considera como agua pura.

RESUMEN

El trabajo expone al secado de madera como un factor influyente sobre las propiedades físicas y mecánicas del mismo. La madera como material obligatorio en cualquier construcción, necesita ser tratado para que sus propiedades sean las más favorables, obteniendo un producto estable, que se desempeñe, satisfactoriamente, en servicio.

En el primer capítulo, se expone de una manera clara y sencilla la importancia del secado de la madera, los factores que lo afectan y los efectos en las propiedades físicas y mecánicas de la madera. El segundo, presenta el secado de madera al aire libre, sus componentes, sistemas de apilado, ventajas y desventajas del tipo de apilado utilizado.

El siguiente capítulo, trata acerca del secado de madera en hornos, el cual es más utilizado en las grandes industrias, se hace énfasis en las características de cada tipo de horno y sus componentes, así como el control que se debe efectuar en la madera durante el secado. El cuarto capítulo, explica otras metodologías de secado poco utilizadas en nuestro medio, pero no menos importantes, exponiendo las características de cada uno y las circunstancias en que deben emplearse.

El quinto capítulo presenta el desarrollo experimental, en el cual, se describen los procedimientos de ensayos, para, luego, en el capítulo sexto obtener los resultados y, finalmente, realizar un análisis comparativo de resultados en el capítulo séptimo.

OBJETIVOS

General

Demostrar la influencia de dos diferentes procesos de secado en las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Específicos

1. Exponer cada uno de los aspectos que intervienen en el proceso de secado de madera.
2. Dar a conocer los métodos de secado de madera existentes, así como, los defectos de secado.
3. Determinar por medio de ensayos las propiedades físicas y mecánicas de muestras de madera verde, muestras secadas al aire libre y en secadas en horno.

INTRODUCCIÓN

La madera es un material que ha sido utilizado por el hombre, debido a su adaptabilidad y excelentes propiedades que le permiten una amplia aplicación. Desde el momento en que un árbol es cortado hasta que su madera deja de ser útil, se presentan una serie de factores que hacen que la madera se deteriore causando grandes pérdidas de material y afectando considerablemente sus propiedades.

La madera como elemento básico en la construcción presenta varias ventajas en aplicaciones estructurales sobre otros materiales. Estas ventajas están, íntimamente, relacionadas con el contenido de humedad de la madera, que a su vez, afecta las características físicas y propiedades mecánicas de la misma. Por ello, es necesario tener un control directo sobre el contenido de humedad presente en la madera.

El secado mejora las propiedades de la madera, controlando su contenido de humedad. La selección del método de secado depende no solo de las características propias de la madera, sino, también, del uso final al que está destinada la pieza.

El secado de la madera requiere de la más alta atención y experiencia; por tal razón, en el presente trabajo se dan a conocer cada uno de los aspectos que intervienen en el proceso de secado, a la vez, se presentan opciones para realizarlo, sin olvidar la parte experimental que demostrará la importancia de éste en las características físicas y propiedades mecánicas del material.

1. PRINCIPIOS DE PROCESO DE SECADO

1.1. Como se encuentra el agua en la madera

La madera recién aserrada tiene un alto contenido de humedad, variando el contenido según la época del año, es por eso que se le llama MADERA VERDE. El agua contenida en la madera verde se encuentra en diferentes formas: agua libre, agua fija o límite y agua de constitución. Las dos primeras son las que se sacan durante el proceso de secado.

El agua libre es la que se encuentra dentro de la cavidad celular de la madera y el espacio libre entre éstas. La célula simplemente sirve como un receptáculo para el agua. Es el agua más fácil de extraer y al eliminarla no se presentan modificaciones apreciables en las características físicas y propiedades mecánicas de la madera.

El agua fija o límite es el agua retenida en la pared celular. Este tipo de agua es el más difícil de sacar; debido a esto el agua libre siempre deja a la madera antes de que lo haga el agua límite. De hecho, el agua límite no puede ser eliminada de una célula, sino hasta que se haya ido el agua libre de la cavidad celular. La mayoría de las características físicas y propiedades mecánicas de la madera están influenciadas por el agua límite.

El agua de constitución es el agua que forma parte de la materia celular de la madera y no puede ser eliminada utilizando los métodos normales de secado. Su eliminación implicaría la degradación total o parcial de la madera.

1.2. Contenido de humedad

La madera es un material que gana y pierde humedad, según sean las condiciones ambientales que la rodean. Aproximadamente el 30% del contenido de agua que contiene la madera verde está retenida dentro de las paredes celulares y el resto es agua libre. A este valor del 30% de contenido de humedad se le llama punto de saturación de la fibra (PSF). En este punto la pared celular está completamente saturada de agua, mientras la cavidad celular se encuentra vacía. Los cambios en el contenido de humedad en la madera arriba del PSF no tienen efecto sobre su resistencia, por tal razón el PSF es importante porque es a partir de este momento que el secado se vuelve más lento y comienzan las contracciones y podrían aparecer algunos defectos del secado.

El contenido de humedad de la madera se define como el peso del agua en su interior y se expresa como un porcentaje con respecto del peso de la madera seca en horno.

Para determinar el contenido de humedad de una muestra de madera se utiliza la siguiente fórmula:

$$M = \left(\frac{W - D}{D} \right) \times 100, \text{ (Ec. 1.1)}$$

Donde:

M = contenido de humedad como un por ciento del peso seco al aire

W = peso de la muestra al momento de la prueba

D = peso de la muestra secada al horno

1.3. Importancia del secado de la madera

Entre las diversas razones para secar la madera, las siguientes son las más importantes:

- a. Estabilización de la forma y dimensiones de las piezas. Los cambios de contenido de humedad abajo del punto de saturación de la fibra traen como consecuencia cambios en su dimensión. Cuando el contenido de humedad aumenta, causa dilatación, y cuando disminuye causa contracción.
- b. El secado de la madera aserrada, reduce sustancialmente su peso y por lo tanto también el costo de transporte y manipulación.
- c. Mejoramiento de las propiedades mecánicas. La mayoría de propiedades de resistencia mejoran a medida que disminuye el contenido de humedad en la madera.
- d. Aumento de la resistencia a la pudrición y manchas. Los organismos que ocasionan pudrición y manchas no pueden permanecer en madera aserrada con contenido de humedad abajo del 20%.
- e. Reducción de la conductividad calorífica, lo que convierte a la madera en un material para la construcción con buen aislamiento térmico.
- f. Disminución de la conductividad eléctrica. La madera seca es muy mala conductora de la electricidad; de hecho, puede funcionar como un buen aislante, mientras permanezca seca.

1.4. Velocidad del secado¹

La velocidad del secado de la madera aserrada depende de varios factores:

Temperatura: Cuando se eleva la temperatura, el desplazamiento de agua desde el centro hacia la superficie es fuertemente acelerado. Si la humedad retenida se mantiene constante, cuando más elevada sea la temperatura, más elevada será la velocidad de secado.

Humedad relativa: Donde la temperatura se mantiene constante, las bajas humedades relativas proporcionan velocidades elevadas de secado.

Circulación del aire: para mantener la velocidad de secado más alta posible para una temperatura y humedad relativa dadas, es necesario tener suficiente circulación del aire en las superficies de la madera aserrada para que se lleve el aire húmedo y fresco y lo reponga con aire más tibio.

Especies: Algunas especies se secan más rápido que otras. Las maderas suaves generalmente se secan con mayor rapidez que las maderas duras. Al igual, una madera muy resinosa necesita más tiempo de secado que una menos resinosa.

Contenido inicial de humedad: La cantidad de humedad contenida en una madera verde afectará el período de tiempo requerido para llevarla a un contenido de humedad dado. En muchas especies maderables la albura tardará más tiempo en secar que el duramen, aun cuando presente una velocidad de secado más rápida, debido sencillamente a que contiene mucho más agua al comenzar.

Dirección del hilo: La madera se seca mucho más rápidamente en dirección longitudinal que en las direcciones transversales.

Grueso: La madera gruesa requiere más tiempo para llegar a un contenido de humedad dado, bajo las mismas condiciones atmosféricas, en comparación con la madera delgada.

1.5. Defectos del secado en la madera

En madera sometida a secado pueden producirse diferentes defectos. Si estos defectos ocurren con mucha frecuencia o en forma muy severa, pueden reducir notablemente el valor de la madera y causar considerables pérdidas en su utilización final.

Para comprender la causa principal de ciertos defectos es necesario tener conocimiento de los siguientes conceptos:

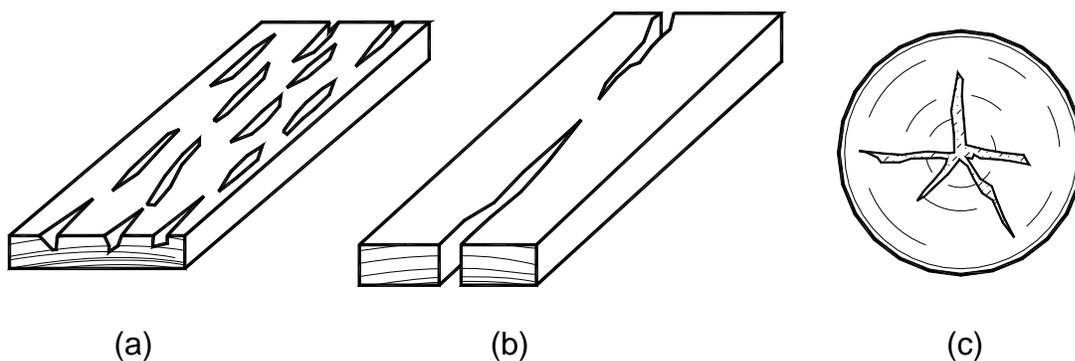
Esfuerzos de la madera: A medida que progresa el secado de una pieza de madera, se desarrollan condiciones de esfuerzos, como resultado del secado desigual y la contracción desigual correspondiente. Cuando la superficie se seca tiende a encogerse y como el interior permanece húmedo, aquella sufre una tensión. Cuando el interior, en un estado posterior de secamiento, empieza a encogerse y la superficie secada anteriormente bajo tensión se opone a este encogimiento se producen esfuerzos de compresión en la superficie y esfuerzos de tensión en el interior.

Hinchamiento y contracción de la madera: Por contracción se entiende a la disminución de las dimensiones radial, tangencial y longitudinal ó del volumen de la pieza, desde el estado húmedo hasta un nivel de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra. Al contrario, el hinchamiento es el aumento de volumen de la pieza, debido a la saturación de agua en la pared celular hasta llegar al punto de saturación de la fibra. El hinchamiento y la contracción de la madera no son iguales en todas direcciones.

1.5.1. Agrietamiento y rajaduras

El agrietamiento es provocado por tensiones excesivas en la madera. Estas tensiones de secamiento se hacen mayores que la resistencia a la tracción de la madera, provocando el agrietamiento.

Figura 1. Agrietamiento y rajaduras: (a) Grietas superficiales; (b) Grietas internas, rajaduras; (c) Grietas extremas



FUENTE: Silverio Viscarra. *Guía practica para el secado de madera en hornos.* p 15

Si las grietas ocurren en la superficie de la madera durante las primeras etapas del secado se le llama *agrietamiento superficial*; son el resultado del secamiento de la superficie abajo del punto de saturación de la fibra cuando el centro aún se encuentra húmedo. Otra causa de estas grietas es la aplicación excesiva de humedad cuando el centro se ha secado, seguido de un rápido resecado de la superficie. Frecuentemente los lados de las grietas se cierran en la superficie al final del proceso, cuando se invierten los procesos y no son visibles en la superficie hasta que la tabla sea cepillada.

Las grietas ocurrientes en las últimas etapas del secado se les llaman *agrietamiento interno*, y puede echar a perder la madera en un gran porcentaje. Es provocado por las rigurosas condiciones de secado en las primeras etapas, que originan esfuerzos intensos de tensión en la superficie y de compresión en el centro. Las grietas se generan en el interior de la tabla pudiendo extenderse hasta la superficie. El excesivo agrietamiento interno se denomina "*apanalado*".

La evaporación del agua es mucho más rápida desde los extremos de la madera que desde otras superficies. Este fenómeno causa con frecuencia lo que se llama *agrietamiento de las puntas o de los extremos*. La mejor forma de impedir este fenómeno es evitando que el sol dé directamente sobre los extremos de la tabla, colocándola bajo techo o pintando los extremos con algún impermeabilizante.

Las rajaduras son separaciones longitudinales de las fibras que atraviesan de una cara a la otra la pieza. Ocurren en los extremos de una tabla debido a una rápida pérdida de agua que origina esfuerzos de tensión. De todos los agrietamientos experimentados, éste es probablemente el más común y severo.

1.5.2. Colapso

Es un fenómeno que consiste en una severa distorsión o aplastamiento de las células de la madera. Ocurre cuando se emplean elevadas temperaturas al principio o en etapas intermedias de la remoción del agua libre.

La medida contra el colapso es la utilización de temperaturas relativamente bajas. Su apariencia es similar al apanamiento; la superficie de la tabla aparece distorsionada debido al aplastamiento de sus células en una intensidad variable, dependiendo de la severidad del colapso. La madera que ha sufrido un colapso severo, generalmente es de forma irregular, con acanaladuras y lomos. Si el colapso no es severo se puede eliminar y la madera se puede restaurar a condiciones normales por medio de un tratamiento de evaporación después del secamiento.

1.5.3. Deformaciones

Son producidas por el secado desigual en la pieza de madera. Las fibras que dan al exterior se contraen, mientras las fibras del interior se mantienen húmedas, provocando esfuerzos internos; aunque también pueden deberse a cargas que actúen sobre la madera durante un lapso prolongado de tiempo.

Las deformaciones comprenden todos aquellos cambios en la forma original de la pieza de madera. Los casos más frecuentes son los siguientes: ²

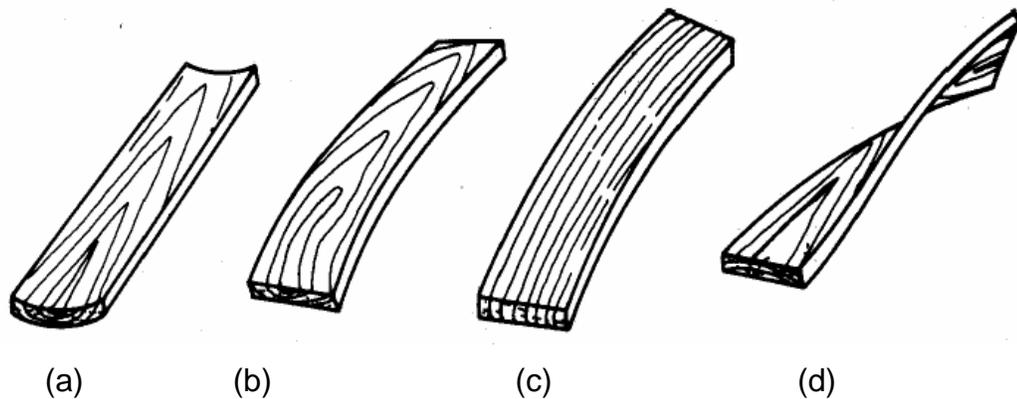
Acanaladura o abarquillamiento: Es la tendencia de algunas tablas de corte plano a desarrollar una curvatura a lo ancho de la pieza.

Combadura o arqueado: Cuando la curvatura se encuentra a lo largo de la cara de la tabla.

Encorvadura: Es la curvatura del lado o canto de una tabla.

Revirado: Es la distorsión en el largo de la pieza.

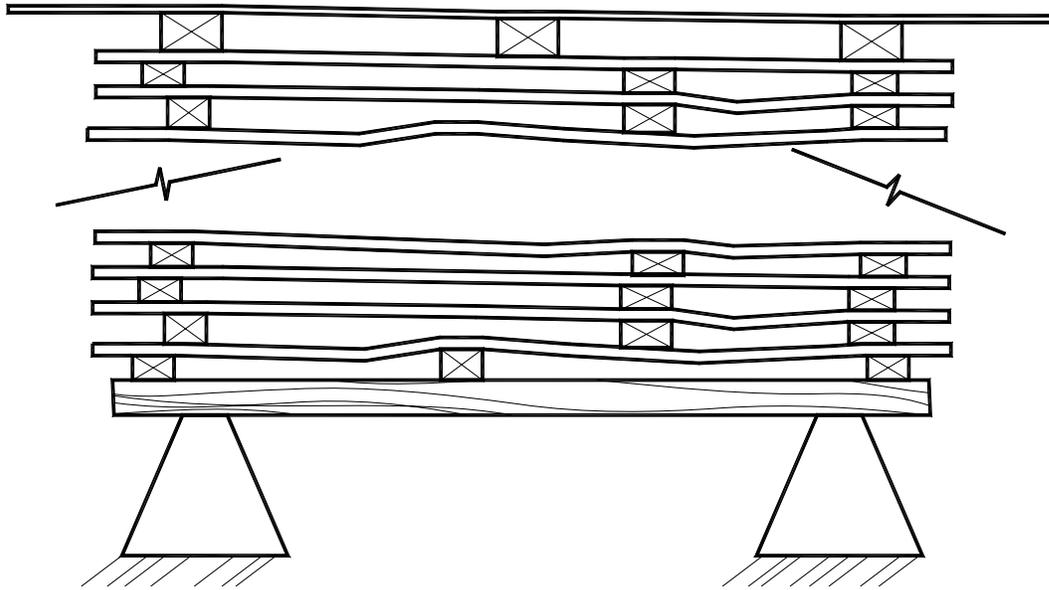
Figura 2. Deformaciones de madera: (a) Acanalado; (b) Combadado; (c) Encorvado; (d) Revirado



FUENTE: Silverio Viscarra. Guía práctica para el secado de madera en hornos. p 17

El mayor factor causante de las deformaciones es el apilado incorrecto. A altas temperaturas, la madera se comporta como un material plástico, adquiriendo la forma que le dictan los esfuerzos aplicados a ella. Si los espaciamentos de los separadores en una pila no están alineados verticalmente, el peso de la madera sobre una tabla particular ocasionara que la pieza se flexione alrededor del separador que esta desalineado. Esta flexión especialmente ocurre en las capas inferiores de la pila. De lo anterior se puede deducir que la forma más efectiva de minimizar las deformaciones es el control estricto del apilado.

Figura 3. Deformaciones causadas por separadores mal distribuidos



FUENTE: CUPRAFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 25

1.5.4. Manchas y mohos

Las manchas son una decoloración de la madera provocada por el ataque de hongos, los cuales no destruyen la madera, pero hacen que pierda su estética. Generalmente es negro-azulado o gris-azulado, pero puede ser café o morado dependiendo del hongo responsable. Pueden producirse durante el secado, el uso de temperaturas bajas es la causa general.

Los mohos que se forman en la superficie de la madera suelen ser de color verde ceniza o verde negrusco. Ellos provocan decoloración en la madera, aunque no muy profunda como los provocados por los hongos causantes de las manchas.

Los hongos causantes de las manchas y del moho, si bien no destruyen la madera, la desvalorizan considerablemente, ya que queda un feo aspecto de inservible para aplicaciones donde se requiere un acabado natural barnizado o aceitado, pero, si son maderas destinadas a la construcción estos defectos no tienen importancia.

Para prevenir este defecto, algunas veces se acostumbra darle un tratamiento a la madera con productos químicos con el fin de hacer posible el uso de temperaturas demasiado bajas para el secado. Éste método es muy eficiente, aunque, representa un aumento en el costo. Otra manera eficaz, es la utilización de un secador con una buena circulación de aire, la existencia de aire pobre e irregular aumenta la posibilidad de aparición de manchas.

1.6. Efectos de la humedad sobre las propiedades de la madera

El contenido de humedad es un factor influyente en varias propiedades importantes de la madera, de las cuales destacan las siguientes:

1.6.1. El Peso

Una de las importancias del secado de la madera es la disminución sustancial de su peso. El agua contenida en la madera lo afecta considerablemente, llegando en algunos casos a pesar más que la misma madera; por consiguiente, es un factor que encárese apreciablemente el transporte.

1.6.2. Resistencia Mecánica

La resistencia de la madera es un factor importante para determinar la aplicación de esta. Existe una relación directa entre la resistencia de la madera y su contenido de humedad abajo del punto de saturación de la fibra. La mayoría de las propiedades de resistencia mejoran a medida que se reduce el contenido de humedad. Uno de los objetivos del secado de la madera aserrada es el de obtener un mejoramiento de sus propiedades mecánicas.³

Si el proceso de secado se desarrolla de la mejor manera, además del aumento de la resistencia de las uniones clavadas, se podrá tener un incremento de esfuerzos, de acuerdo al cuadro siguiente:

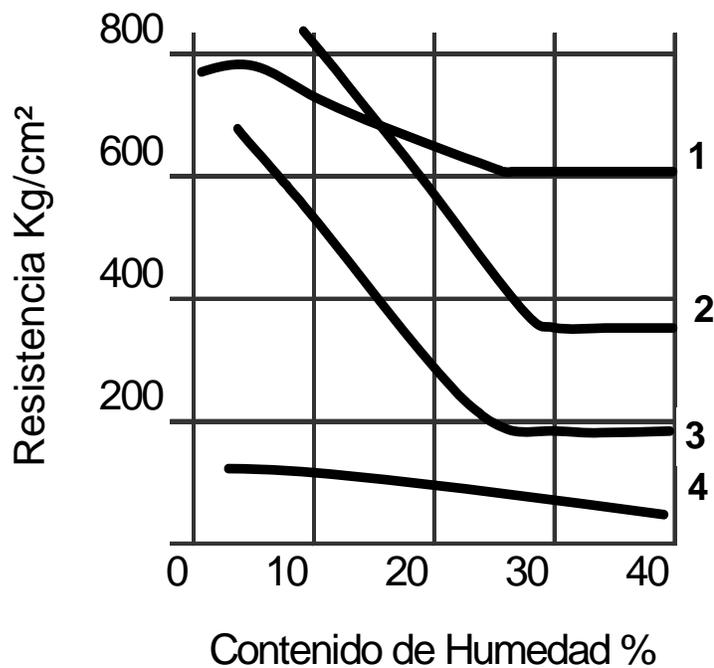
Tabla I. Promedio de incremento de esfuerzos al decrecer la humedad en 1%

PROPIEDAD	INCREMENTO
Flexión	5.0 %
Compresión paralela a la fibra	6.0 %
Compresión perpendicular a la fibra	5.5 %
Dureza	4.5 %
Corte paralelo a la fibra	3.0 %
Tensión paralela a la fibra	1.5 %
Impacto (flexión)	3.0 %

FUENTE: William Ramón Godinez Mansilla. Ingeniería de la madera en Guatemala. p 3

El grafico siguiente ilustra la influencia del contenido de humedad en las propiedades de resistencia.

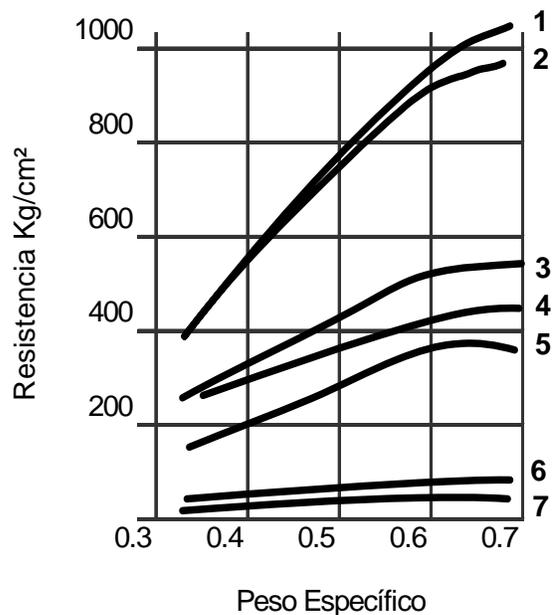
Figura 4. Propiedades de resistencia de la madera de pino en función del contenido de humedad. 1, Tensión paralela a la fibra; 2, Flexión estática; 3, Compresión paralela a la fibra; 4, Compresión perpendicular a la fibra



FUENTE: Eliel J. Sahlman. Secamiento artificial de la madera. p 17

Existe además, una relación entre la resistencia y el peso específico de la madera, en general, una madera más densa es más resistente que una menos densa. El peso específico de la madera es la relación del peso de la madera a su volumen aparente al mismo grado de humedad.

Figura 5. Propiedades de resistencia de la madera de pino en función del peso específico (contenido de humedad 15%). 1, Tensión paralela a la fibra; 2, Flexión estática; 3, Compresión paralela a la fibra; 4, Dureza paralela a la fibra; 5, Dureza perpendicular a la fibra; 6, Compresión perpendicular a la fibra, y 7, Tensión perpendicular a la fibra



FUENTE: Eliel J. Sahlman. Secamiento artificial de la madera. p 17

1.6.3. Variaciones dimensionales

Las variaciones dimensionales de la madera son el resultado de la contracción o hinchamiento que experimentan las células que la componen, al variar su contenido de humedad. La madera al secar se contrae y al humedecerse se hincha; por tanto, si se han de reducir al mínimo los cambios de dimensión de la madera cuando está en uso, se le debe secar lo más cerca posible al contenido de humedad que tendrá el ambiente en que se usará.

1.6.4. Durabilidad

La durabilidad natural de la madera es la oposición que ofrecen las maderas, de las diferentes especies, a la pudrición. Ésta puede variar de una especie a otra, aunque se ve afectada directamente, por el contenido de humedad.

La humedad es necesaria para la vida del hongo que causa la pudrición. La madera debe tener un contenido de humedad superior al 20% para ser atacado por los hongos. Por tal motivo, la madera seca al aire generalmente no sufre de pudrición.

La durabilidad que presenta la madera es muy importante, ya que la pudrición implica la destrucción de las paredes celulares, por lo tanto, afecta y reduce totalmente la resistencia mecánica. En las etapas avanzadas, la pudrición, transforma la madera en una masa quebradiza, carente de toda aplicación.

2. SECADO AL AIRE LIBRE

Este método se realiza apilando la madera al aire libre, de tal manera que quede expuesta a una atmósfera secante. Éste sistema es el más antiguo, sencillo y económico, con él pueden extraerse grandes cantidades de agua de la madera aserrada.

El objetivo del secado al aire libre es reducir el contenido de humedad de la madera aserrada, hasta obtener un valor que sea uniforme con las condiciones climáticas circundantes. El inconveniente, es el requerimiento de mucho tiempo y espacio, además, no es posible controlar la temperatura, la humedad relativa y la circulación del aire; tampoco se eliminan por completo las larvas de los insectos.

La madera secada al aire libre ofrece estabilidad dimensional para las aplicaciones que requieren exposición a la intemperie tales como bodegas, graneros, puentes y otras edificaciones en general. Para maderas con aplicaciones especiales, tales como, acabados, muebles, madera para exportación, etc., se requiere el uso de secadores.

En general, el secado de madera al aire libre depende de tres factores: ⁴

- a. Una buena circulación de aire alrededor de la pila para eliminar la humedad de la superficie de la madera.
- b. La madera necesita calor para eliminar el agua dentro de la madera y esto se logra con el calor que produce el sol.

- c. Baja humedad relativa del ambiente (por ejemplo en verano).

Es evidente que al secar la madera al aire libre, no se pueda reducir su contenido de humedad a un porcentaje menor que el correspondiente a la humedad de equilibrio del ambiente; éste es determinado por la humedad relativa y la temperatura ambiental de la zona.

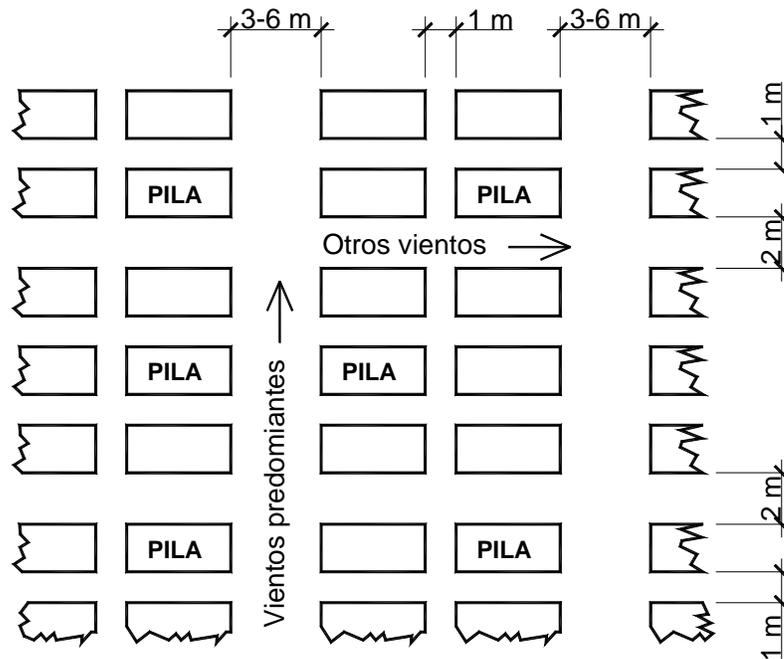
Para que el secado al aire libre sea adecuado es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

2.1. Patio de secado

El patio de secado debe ser un terreno plano, bien drenado, sin obstáculos a la circulación del aire, tales como árboles, lomas, edificios u obstrucciones similares. El patio también debe estar localizado en dirección a los vientos dominantes, permitiendo tomar las mejores ventajas de estos. Es preferible no localizar el patio de secado cerca de grandes depósitos de agua, como mares y lagos, o en un área donde la tierra este mojada, ya que esto tiende a retardar el proceso de secado.

Un patio normalmente contiene varias pilas de madera, separados por pasillos o callejones, los cuales son caminos para transportar la madera adentro y hacia fuera del patio. Por ello es aconsejable que las avenidas principales entre las pilas corran en el sentido de los vientos y tengan en lo posible, un ancho que oscile entre 3 y 6 metros. El ancho de las calles secundarias debe ser de unos 2 metros y la separación entre pilas de 1 metro. Con esto se facilita notablemente la circulación del aire.

Figura 6. Disposición del patio de secado al aire; se señala la posición de las pilas con sus avenidas de tránsito y circulación de aire



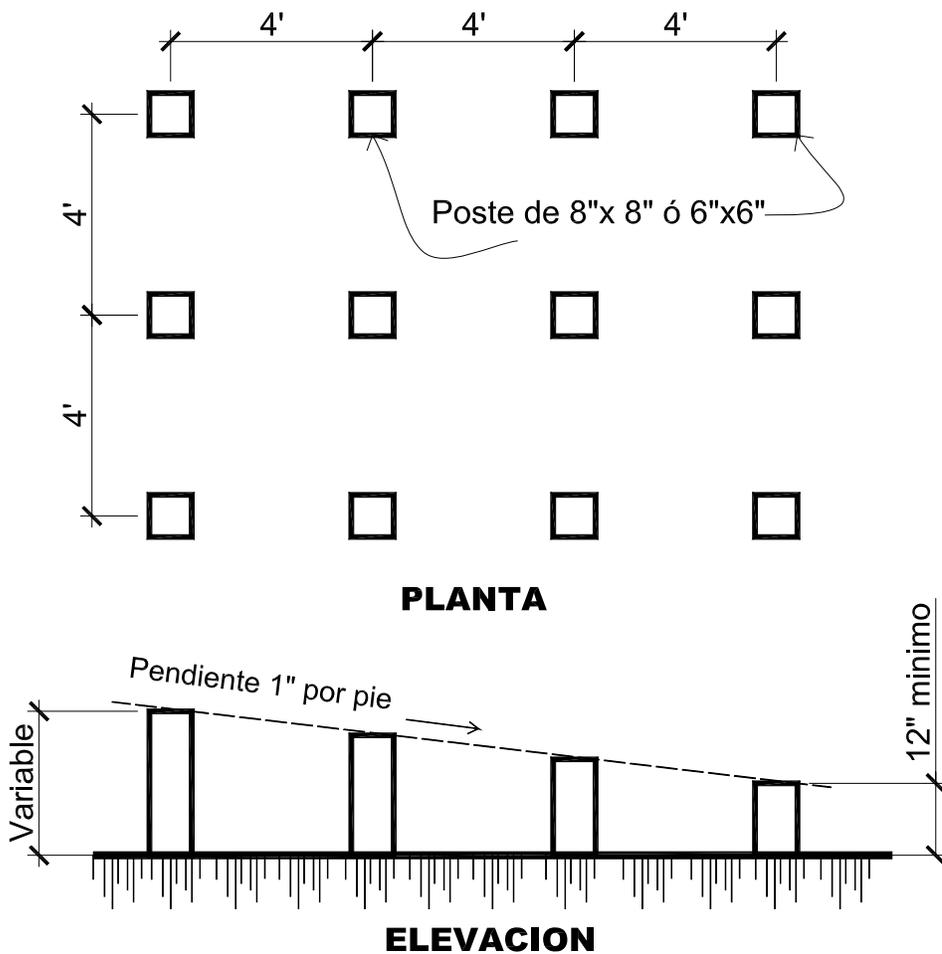
FUENTE: Corporación Chilena de la Madera. Madera: propiedades, clasificación, medición y aplicaciones. p 13

2.2. Cimientos

Los cimientos tienen el objetivo de evitar el contacto directo de la madera aserrada con el suelo y sostener la carga máxima de la madera que se ha de apilar sobre ellos. Deben estar bien nivelados para evitar deformaciones de las diversas piezas, y que tengan una altura suficiente para permitir la circulación del aire en cualquier dirección. Es importante que sean lo suficientemente durables y resistentes a microorganismos destructores de la madera.

Cuando se trata de patios temporales es conveniente usar cimientos de madera resistente a la pudrición; en patios permanentes conviene hacerlos de concreto. Los cimientos pueden ser de 8 x 8 pulgadas o de 6 x 6 pulgadas, y con una altura mínima, sobre el nivel del suelo, de 12 pulgadas. Si se utilizan cimientos de madera, deben construir de madera resistente a la pudrición o que haya sido tratada con preservantes para hacerla resistente a la misma.

Figura 7. Colocación de los cimientos para el apilado



Es favorable para el mejor escurrimiento de las aguas de lluvia, recortar uno de los lados de los cimientos, de modo que ofrezcan una inclinación, hacia el lado del que viene la lluvia, de 1 pulgada por cada pie de la longitud de la madera apilada. En la parte superior de los cimientos, se colocan unas vigas longitudinales de 4 x 6 pulgadas a todo lo ancho de la pila; sobre las vigas se colocan los separadores en forma transversal con respecto a las vigas longitudinales.

2.3. Apilado

Además de la elección del patio de secado y la colocación adecuada de los cimientos para el apilado, es necesario tomar en cuenta cada uno de los elementos que hacen posible que el apilado sea funcional.

2.3.1. Dimensiones de la pila

Las dimensiones de la pila dependen de la cantidad de madera a secar y del espacio disponible, sin embargo, se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- El ancho de la pila no debe excederse de los cuatro pies (48 pulgadas).
- El alto depende de las instalaciones y técnicas que se sigan para apilar.
- El largo de la pila depende de la longitud de la madera a secar.

2.3.2. Separadores

Los separadores son tiras de madera que se usan para separar las capas de tablas de madera. Éstos deberán estar secos, tratados contra manchas, tener igual grosor y estar colocados entre 18 y 24 pulgadas de distancia a todo lo largo de las tablas. Cada separador se coloca en la parte superior de las tablas de madera, alineados verticalmente con la capa inferior.

Los separadores cumplen las siguientes funciones:

- Separar las hileras de madera de forma que el aire pueda pasar a través de ella para secarla.
- Distribuir el peso de la madera de forma vertical, trasladándolo a la viga longitudinal y luego a los cimientos.
- Mantener las capas de madera planas.

Cuando los separadores no están alineados, están colocados muy cerca del borde o no los hay, se perjudica la calidad de la madera al causarle retorcimientos, torceduras y levantamiento de los extremos, así como otro tipo de deformaciones. Los separadores deben estar colocados a un separador de distancia del extremo de la pila.

El grosor de los separadores comunes es de 3/4 de pulgada, aunque pueden variar de 5/8 de pulgada hasta 1 pulgada. En el secado al aire libre se recomienda utilizar separadores de 1 x 1 pulgada. Es importante que los separadores de la misma capa de madera tengan igual grosor para evitar deformaciones en las tablas.

2.3.3. Separación y colocación de tablas

Para que exista una buena circulación del aire, las tablas deberán colocarse por lo menos a 1 pulgada de distancia y sobre los listones separadores. Si la madera se apila de forma plana la separación entre tablas deberá ser de 2 pulgadas. Para que exista un buen desagüe, el extremo frontal de la pila deberá sobresalir 1 pulgada por cada pie de altura.

2.3.4. Techo

En el secado al aire libre, el sol es el elemento más beneficioso pero a la vez más perjudicial. La madera expuesta directamente a los rayos del sol, recibe un calor superficial causando agrietamiento superficial y agrietamiento en los extremos. Otro elemento perjudicial, es la lluvia, ésta retarda el secado, y favorece la aparición de manchas.

Para proteger la madera del sol y la lluvia, en la parte superior de la última capa de madera apilada se colocan viguetas de madera de 4 x 6 pulgadas y del largo necesario para que se proyecten por lo menos 6 pulgadas en los extremos de la pila. Sobre estas viguetas se coloca el techo, el cual puede ser de lámina galvanizada, plástica, cartón asfáltico ó madera de baja clase que no presente manchas, pudrición, hongos e insectos. El techo es de una sola agua, una inclinación aproximada de 1 pulgada y media a cada 2 pies. El voladizo debe tener 12 pulgadas en el frente y los extremos, y 30 pulgadas en la parte posterior de la pila. Para asegurar el techo contra los vientos, éste se puede anclar a la pila con alambre.

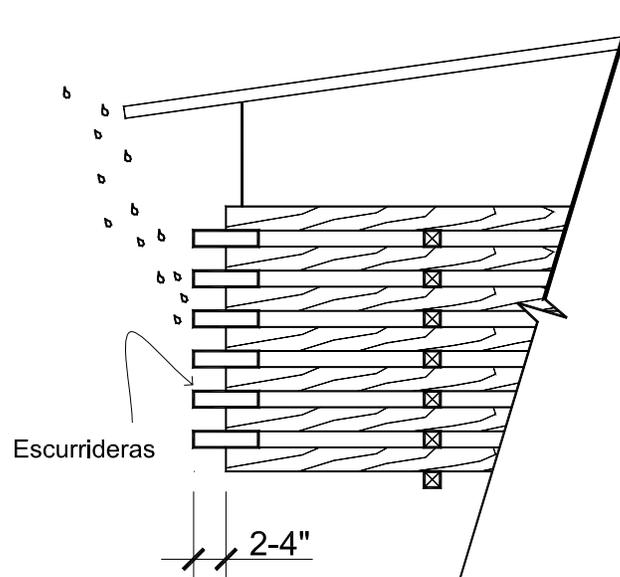
2.3.5. Protección de los extremos

A veces no es suficiente con techar la pila para proteger la madera de los defectos de intemperie, además, la madera se seca con más rapidez por sus extremos que por sus caras y cantos, facilitando la aparición de las grietas en los extremos. Existen cuatro formas de proteger los extremos de la madera:⁵

2.3.5.1. Ecurrideras

Cuando las puntas de las piezas de la madera apilada se encuentran alineadas verticalmente, los separadores pueden sustituirse por tablillas que sobresalgan de 2 a 4 pulgadas, de modo que el agua que caiga sobre ellas escurra fuera de la pila.

Figura 8. Colocación de escurrideras en los extremos de la pila horizontal

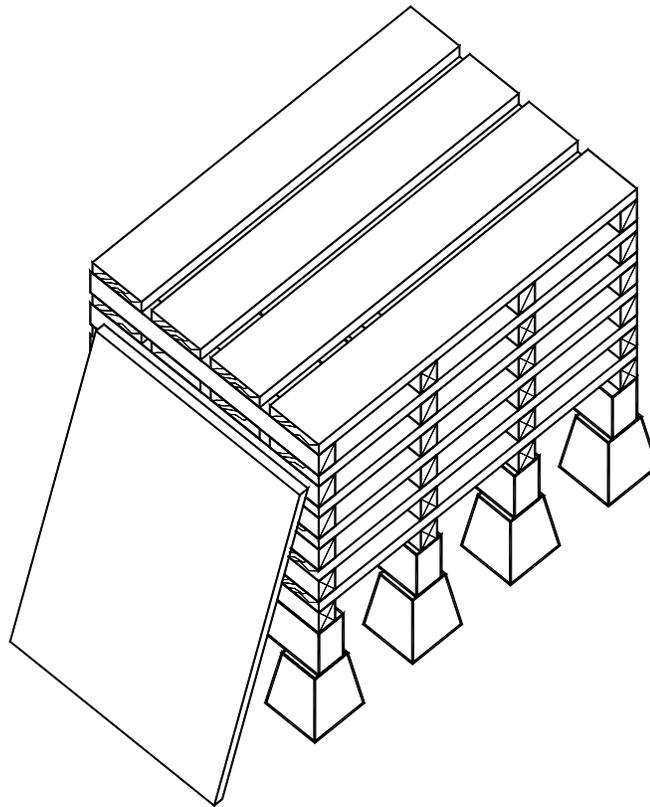


FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 22

2.3.5.2. Sombras o parasoles

Una de las causas del agrietamiento en las puntas de las piezas es el contacto directo de los rayos solares con el extremo de la pila. Por lo general, el techo de una pila únicamente cubre las piezas de madera de la parte superior, quedando las capas inferiores desprotegidas. Para cubrir las capas inferiores se pueden utilizar sombras o parasoles, que se fabrican de madera de baja calidad y se colocan sobre los costados de la pila.

Figura 9. Colocación de sombras o parasoles en los extremos de una pila horizontal

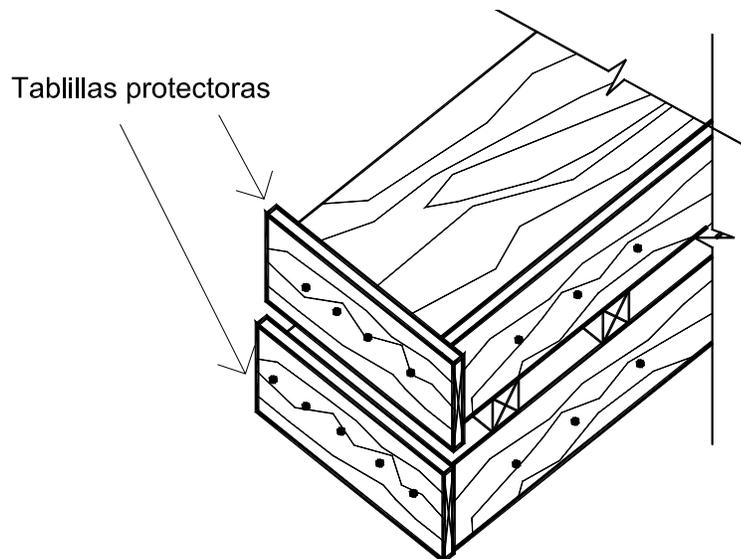


FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 22

2.3.5.3. Tablillas en los extremos

Cuando las piezas de madera tienen una sección muy grande se utilizan tablillas para cubrir los extremos. Las tablillas deben ser de las dimensiones de la sección y estar clavadas a los extremos.

Figura 10. Colocación de tablillas protectoras en los extremos de una pila horizontal

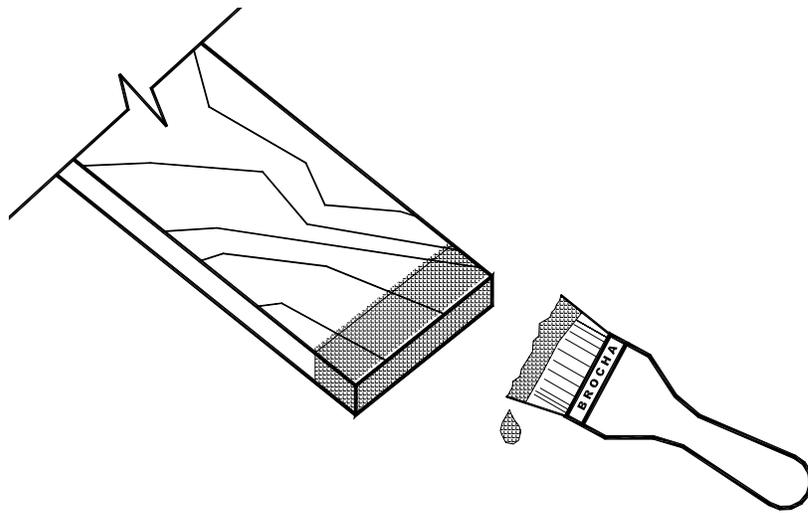


FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 23

2.3.5.4. Pintura y parafina

Otra forma de proteger los extremos es la utilización de algún recubrimiento impermeable, como la pintura y la parafina. Si se utiliza parafina, debe aplicarse derretida. También puede emplearse brea derretida, asfalto y algunos barnices. Cada pieza debe cubrirse hasta la profundidad de las grietas observadas en la pieza.

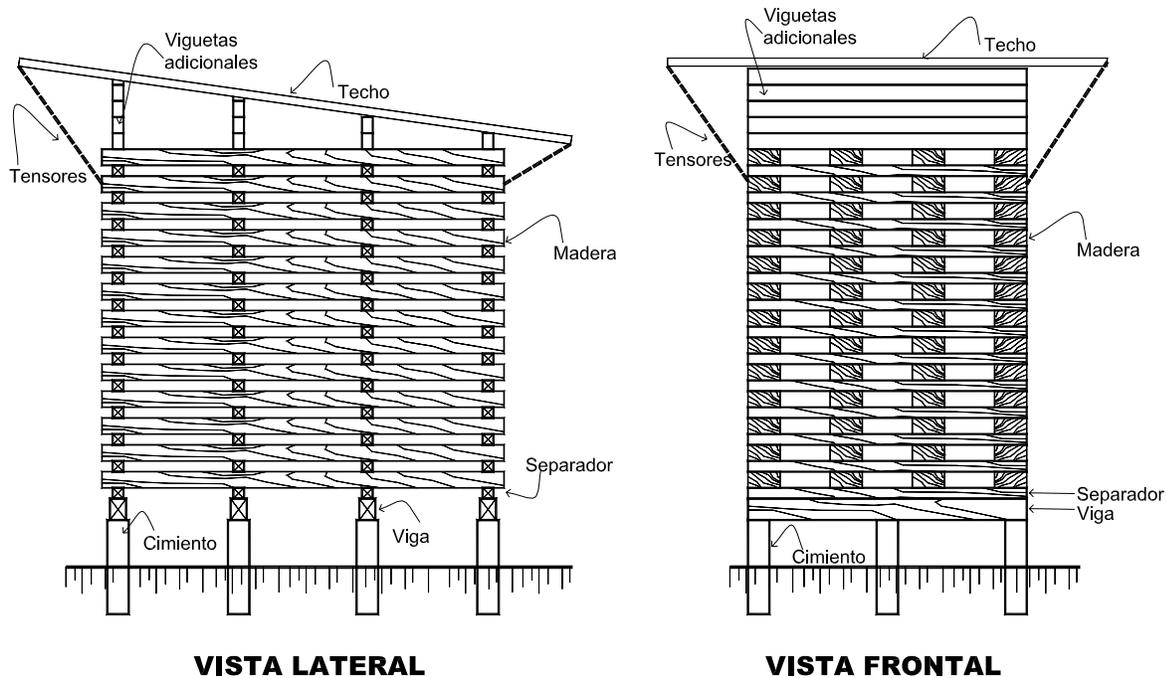
Figura 11. Aplicación de pintura o parafina en los extremos para su protección



FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 23

En general, una pila de madera bien realizada, es la que se encuentra en un lugar abierto, nivelado, con buen drenaje y que no se inunde. Las cimientos deberán tener a la madera 12 pulgadas por encima del suelo y el techo deberá protegerla del sol y la lluvia. Los separadores deberán estar alineados verticalmente y serán de igual ancho en la misma capa de tablas.

Figura 12. Madera apilada bajo techo



FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 21

2.4. Sistemas de apilado

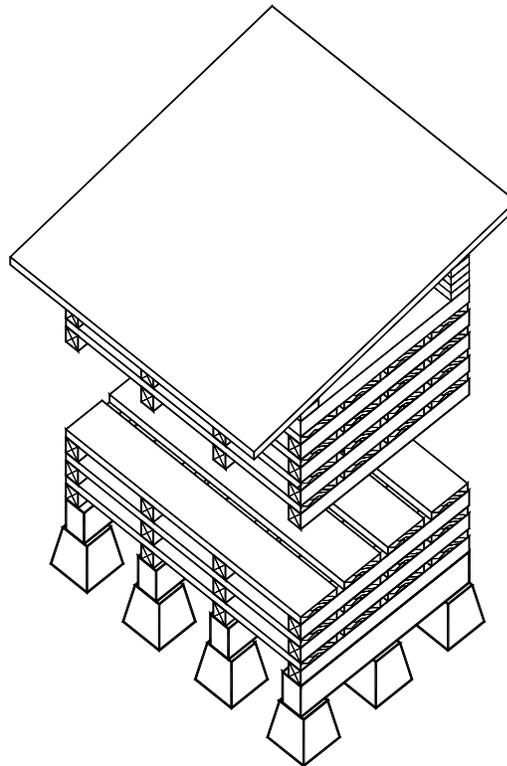
En la actualidad existen varios sistemas de apilado, el método a utilizar depende de las condiciones de espacio y tiempo de secado requeridos. Entre los más prácticos se encuentran los siguientes:

2.4.1. Pila plana horizontal

Es el más práctico y utilizado para apilar madera. Cada capa tiene el mismo grosor y longitud, separada entre sí por listones de madera llamados separadores.

En una pila horizontal, el secado es mas uniforme, los defectos son mínimos y es fácil de armar y desarmar. La desventaja es la necesidad de utilizar separadores uniformes y el no poder sacar madera del centro durante el proceso de secado.

Figura 13. Apilado horizontal o plano



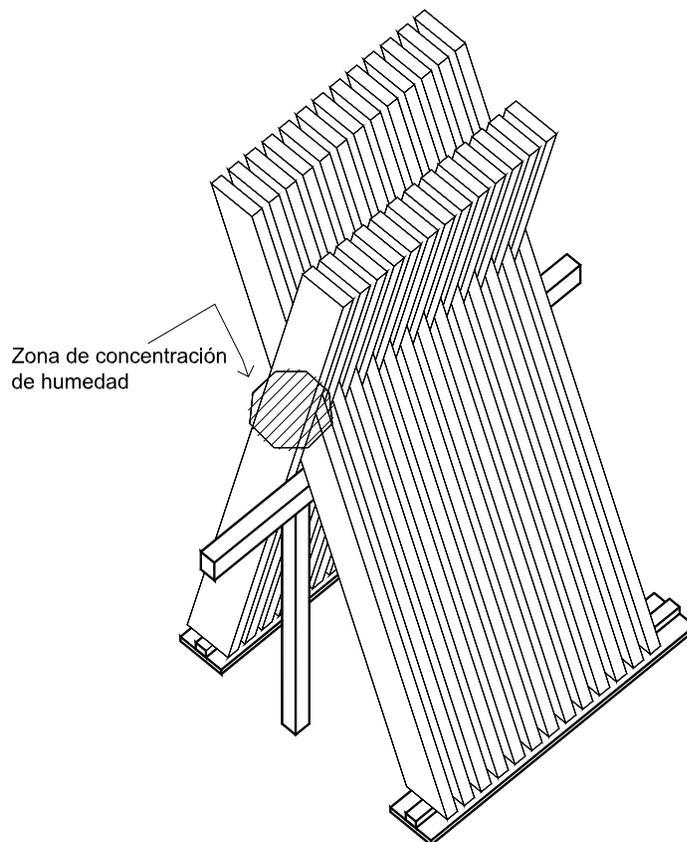
FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 9

2.4.2. Caballete⁶

Las tablas se apoyan de canto sobre soportes adecuados y formando una "X" con las tablas apoyadas al otro lado del soporte. Los extremos inferiores se apoyan sobre piezas de madera uniformes en su dimensión, para evitar el contacto directo con el suelo y evitar pudrición.

En este sistema no se utilizan separadores; únicamente una persona es necesaria para realizar el apilado; el secado superficial es rápido evitando la aparición de manchas y es posible revisar y extraer las piezas cuando se necesiten, sin embargo, existe la tendencia de la madera a torcerse y agrietarse, tanto en los extremos; la madera contiene mayor humedad en el extremo inferior; las piezas de madera se manchan en las áreas de contacto; se requiere de mayor espacio y debe emplearse un sitio cubierto, pues no es posible techar la pila.

Figura 14. Apilado en forma de caballete

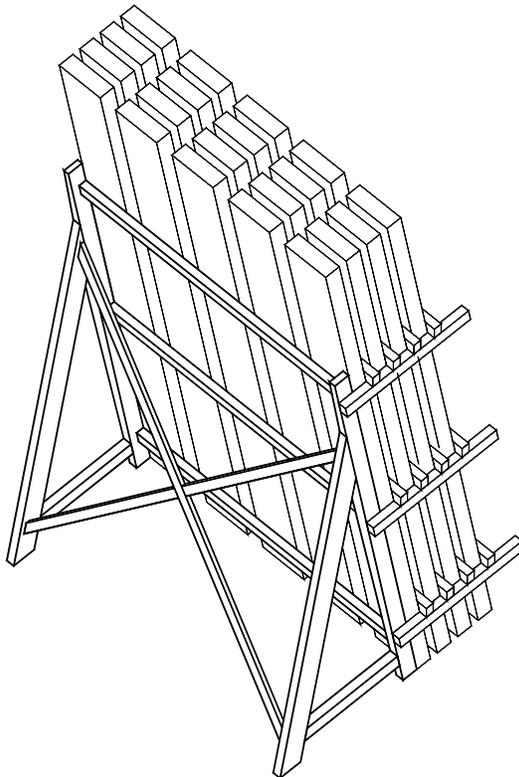


FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 9

2.4.3. Sistema vertical⁷

La madera apilada se apoya verticalmente o inclinada contra un muro o un caballete recargada sobre una cara. Para sujetar las piezas entre sí se utilizan tensores u otro amarre similar, ya que no se tiene auxilio del peso propio que evita la flexión. Los separadores se colocan según lo expuesto para las pilas horizontales. Los extremos inferiores de la madera no se apoyan directamente en el suelo.

Figura 15. Apilado sistema vertical



FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 9

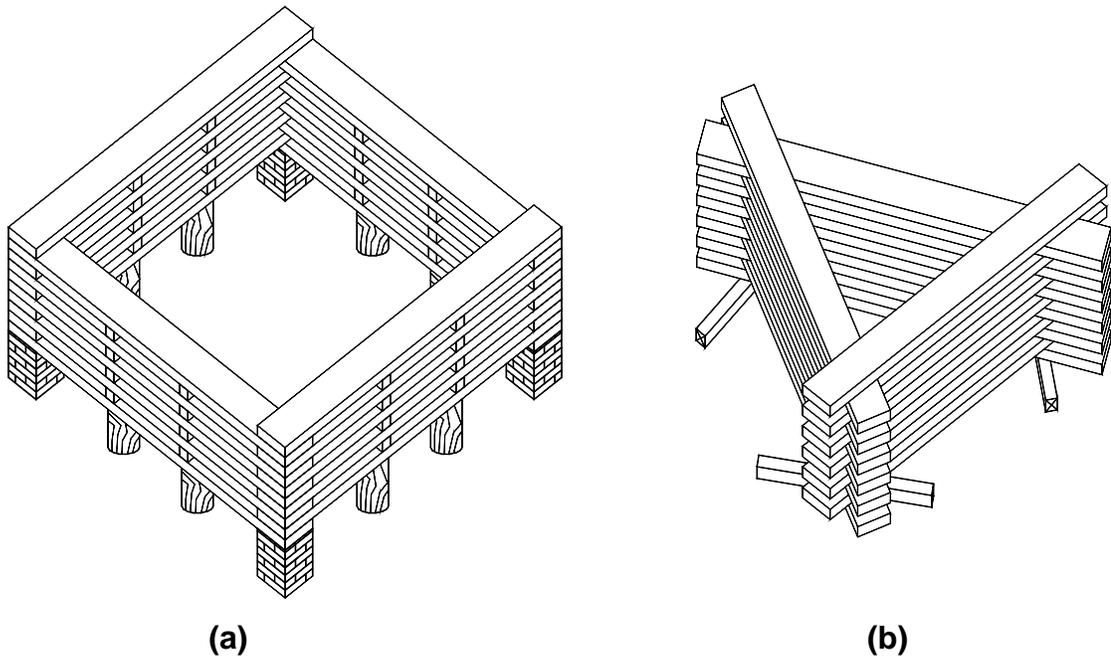
Al apilar la madera de esta forma, se usan menos separadores; sólo una persona es necesaria para realizar el apilado; el secado superficial es rápido evitando la aparición de manchas y no se requiere de vigas y cimientos. Las desventajas son la tendencia de la madera a torcerse y agrietarse tanto en los extremos como en su superficie; la madera contiene mayor humedad en el extremo inferior y es necesario construir los caballetes que sostienen la madera.

2.4.4. Sistema jaula cuadrada y triangular

En estos sistemas la madera a secar va formando una especie de castillos abiertos en su centro. Estos apilados requieren de mucho espacio, son apilados horizontales pero utilizan únicamente el perímetro de la pila, por lo que permite un secado muy rápido.

Estos sistemas permiten buenos resultados en madera recién cortada y con buen comportamiento en el secado; así como la facilidad y rapidez en la construcción de la pila, requiriendo una menor cantidad de separadores. No obstante, favorece el manchado de las esquinas donde se apoyan entre sí las piezas de madera; no permite un techado sencillo; requiere un mayor espacio y la utilización de cimientos.

Figura 16. (a) Apilado sistema jaula cuadrada; y (b) Apilado sistema jaula triangular

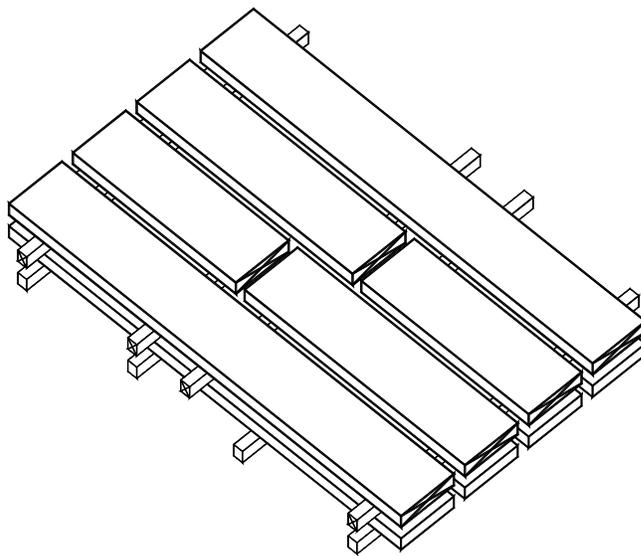
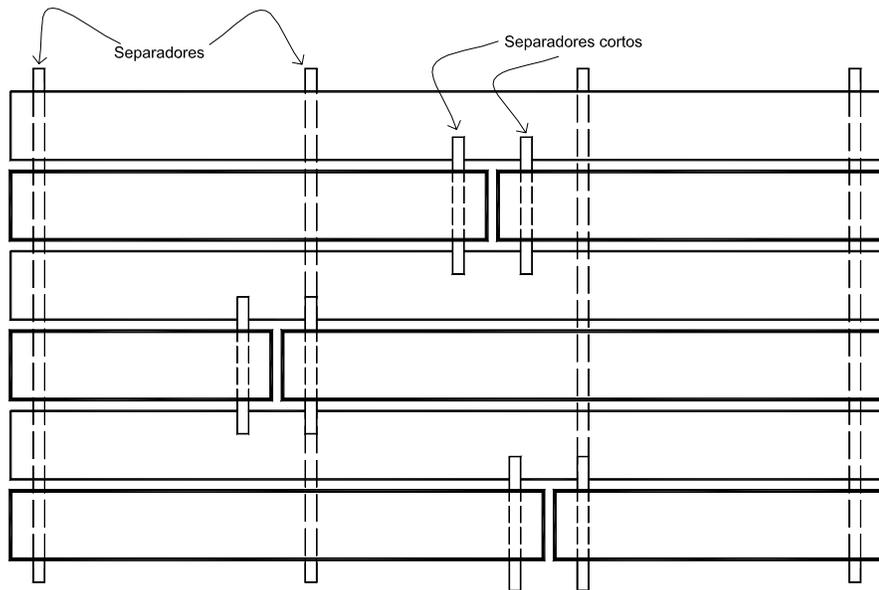


FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 9

2.4.5. Sistema horizontal en caja

Es preferible colocar en una pila madera del mismo largo, en caso de no ser posible, se utiliza el sistema horizontal en caja. Este método es idéntico al sistema plano horizontal, con la variante de utilizar separadores cortos para sostener la madera de menor longitud. La longitud máxima de la madera que se va apilar determina la longitud de la pila. Las tablas de longitud completa se seleccionan para los bordes de cada hilera. Las tablas de tamaño intermedio se van alineando, una con un extremo, la siguiente con el otro, y así sucesivamente en forma alternada.

Figura 17. Apilado sistema horizontal en caja



FUENTE: CUPROFOR. Aprendiendo a secar madera al aire libre. p 19

3. SECADO EN HORNOS

Los hornos para secar madera aserrada, son cámaras equipadas de tal manera, se pueda tener un control apropiado sobre la temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y variaciones del clima, limitaciones impuestas en un patio de secado al aire libre.

Las principales razones del uso de hornos secadores son:⁸

- a. El secado en horno es muy rápido, comparado con el secado al aire libre.
- b. El secado en hornos permite obtener humedades suficientemente bajas para que la madera aserrada pueda ser utilizada en la fabricación de muebles, paneles, o en general, tener aplicaciones interiores.
- c. La mancha azul y otras pueden ser totalmente evitadas, si la madera se somete al secado inmediatamente después de aserrada.
- d. El espacio destinado a la manipulación de la madera se reduce notablemente en comparación con el secado al aire. Con esto se facilita la supervisión y la protección contra incendios.
- e. Posibilidad de utilizar los desperdicios de madera para generar calor y fuerza para el secador.

- f. El secado en hornos no es afectado por condiciones climáticas.

3.1. Características generales

Los hornos para secar madera, deben ser físicamente tan fuertes como para soportar las cargas de la madera y el equipo de calentamiento, tener un buen aislamiento térmico, ser de construcción hermética, disponer de puertas de fácil manejo, fabricarse de materiales resistentes a la corrosión y a altas temperaturas.

Para que un horno satisfaga las características anteriores debe cumplir con los siguientes requisitos de construcción:

- a. Los mejores cimientos para hornos son los construidos de concreto, éstos deben ser capaces de resistir la construcción del horno y la carga provocada por la madera a secar.
- b. Las paredes de los hornos deben soportar el techo y tener suficiente aislamiento; pueden ser construidas de mampostería, concreto vaciado, bloques de cerámica, aunque el material más común es el ladrillo.
- c. Los techos, al igual que las paredes deben ser lo suficientemente fuertes para asegurar que el horno tenga una vida prolongada. Los materiales para su construcción son la madera, concreto reforzado o una mezcla de concreto y teja.

- d. Los mejores diseños de hornos exigen que las puertas de ingreso sean de peso ligero, fácil de abrir y cerrar. Las puertas se construyen con material aislante, algunas veces de madera y otras de metal.
- e. El interior del horno debe estar protegido contra la corrosión, tanto en el metal como en el concreto. La mejor manera de proteger el interior es utilizando pintura especial, que generalmente se fabrica de asfalto.

3.2. Calefacción

El calor proporcionado por un horno eleva la temperatura del aire en el interior de este, además, evapora la humedad de la madera, si la temperatura es elevada la evaporación se efectuara a una velocidad mucho mas rápida en comparación de cuando la temperatura es baja. Debe señalarse que el mayor problema del secado es el desplazamiento de agua desde el centro a la superficie, al utilizar temperaturas altas el desplazamiento del agua del centro hacia la superficie es acelerado, si la temperatura es baja aumentara la gradiente de humedad provocando grietas no deseables en la superficie de la madera.

El calor se proporciona al horno de secado por medio de sistemas de vapor y de aire caliente. Los sistemas de vapor son los mas difundidos, utilizan como medios de radiación de calor los radiadores caseros, que tienen costos relativamente altos; unidades calefactores colocadas como ventiladores y serpentines de tubo, en los cuales el calor de la caldera se distribuye en los tubos del serpentín y luego al colector de drenaje.

Algunos hornos para el secado utilizan directamente el aire caliente y los gases de la combustión de la caldera, para calentar la madera. En éstos las unidades de calefacción están situadas normalmente en la parte exterior de la cámara de secado, y el aire caliente se introduce a ella a través de una red de ductos y se regresa de una manera similar.

3.3. Clasificación de los hornos

Los hornos para secar madera se clasifican comúnmente sobre la base del método de carga y el tipo de circulación del aire.

3.3.1. Método de carga

Sobre la base del método de carga, los hornos se clasifican como del tipo progresivo o del tipo de compartimiento.

Los hornos progresivos están formados por cámaras largas, generalmente alrededor de 40 m, y se le conoce también con el nombre de túneles. Los carros de madera se cargan por un extremo donde existe alta humedad y baja temperatura. A medida que la madera avanza por el túnel, va encontrando un ambiente de menor humedad y mayor temperatura, hasta que llega al extremo de salida, donde es sometida a la mayor temperatura y menor humedad. En cualquier momento, los hornos progresivos contienen madera en los varios estados sucesivos de secado, desde madera seca en los extremos de descarga, hasta madera con el contenido de humedad inicial en el extremo de carga. Como el proceso es continuo, cada vez que sale una pila de madera seca, se introduce una nueva por el extremo opuesto.

El horno del tipo progresivo, conviene más en los casos en que la mayor parte de la madera requiere un método similar de secamiento, como ocurre en los aserraderos de pino insigne. Aunque no tiene tanta flexibilidad en su operación como los de compartimiento, son sin embargo, más económicos en el uso del calor, y también más fáciles de operar.

En los hornos de compartimiento, la madera aserrada se introduce en él hasta llenarlo, luego se cierra el horno y la madera se seca. El proceso se efectúa según un programa determinado que corresponde a las características de secamiento de la especie y a la calidad que se requiera de la madera seca. Después de terminado el proceso, se saca la totalidad de la carga. La circulación del aire a través de las pilas es inducida por ventiladores colocados, por lo general, encima de las pilas de madera.

El secador de compartimiento es más adecuado para industrias que tienen que secar diversas especies de madera en cantidades limitadas con diferentes características de secamiento y requisitos de calidad.

3.3.2. Circulación de aire

Los propósitos de la circulación del aire en los hornos para secar madera son los siguientes:

- a. Distribuir uniformemente el calor por todo el horno.
- b. Proporcionar un medio de mezclado y acondicionamiento de aire antes de que entre a la carga.

- c. Transformar la humedad evaporada de las superficies de las tablas.
- d. Transportar el calor de los serpentines calefactores y así aumentar la velocidad de transmisión de calor.

Sobre la base de circulación de aire, los hornos de secado se clasifican como hornos de circulación natural y hornos de circulación forzada.

Los hornos de circulación natural se han diseñado para suministrar el movimiento del aire por medios naturales. Debido a que el aire caliente se eleva y el aire frío desciende, es posible obtener la circulación del aire a través de la carga, por el mantenimiento de una diferencia de temperatura entre la parte alta y el fondo del horno.

Puesto que la circulación natural del aire es lenta, los hornos modernos están equipados con ventiladores, los cuales proporcionan una circulación forzada del aire. Estos ventiladores pueden estar situados fuera o dentro de la cámara del horno, y en la mayoría de los hornos modernos son reversibles. Los ventiladores reversibles, permiten cambiar la dirección de circulación cada cuatro a ocho horas. Esto permite reducir al mínimo las diferencias de secado en la carga entre el lado de entrada y el lado de salida del aire.

3.4. Apilado y cargado del horno

La construcción de la pila del horno es de importancia primordial. Aún si todos los demás factores son perfectos, su falla presentara, con seguridad, degradación del material en forma de combaduras, revirado o torceduras, rajaduras en extremos y desigual contenido de humedad en las piezas.

Hay muchas precauciones que deben ser rígidamente observadas para asegurar la máxima eficiencia de secado con el mínimo daño del material, estas se indican a continuación:

- a. Pilas, deben estar bien alineadas verticalmente y horizontalmente. El tamaño de la carga dependerá de la capacidad y tipo de horno a ser empleado. La carga debe ser apilada de tal manera que se permita al aire moverse en forma adecuada a través de toda la carga. Generalmente la madera se coloca en pilas muy cerca una de otra, para que el aire se mueva a través de las caras anchas de las tablas. También se debe tener cuidado para asegurarse de que no se ha dejado excesivo espacio entre las cargas, pues esto da por resultado una reducida circulación del aire.
- b. Sobresalido de los extremos, los extremos de las piezas deben quedar alineados porque los que sobresalgan, al no estar soportados, se curvarán bajo su propio peso y se deformarán. Esto afecta a la tabla en particular y al resto de la pila, pudiendo causar distorsión en toda la carga. Por otro lado, con el sobresalido de los extremos, el secado de esas piezas es más rápido con respecto al resto de la pila y puede presentarse un severo agrietamiento en los extremos.
- c. Separadores, deben ser de un espesor, entre 12 mm. ($\frac{1}{2}$ ") y 25 mm (1"), los más delgados se usan cuando se quiere disminuir la eficiencia en el secado de la madera. Se prefieren anchos entre 25 mm. (1") y 37 mm. (1 $\frac{1}{2}$ "). Los separadores deben estar exactamente alineados en dirección vertical y espaciados hasta 60 cm (2'), uno del otro en la misma pila.

- d. Clasificación por largos, para evitar el problema antes mencionado se puede clasificar la madera a secar por largos antes de armar la pila. Las tablas largas pueden ser usadas para las hiladas 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 de la carga sean cuadrados. Si el largo de esas piezas es tal que sus extremos no caben dentro del espacio normal de los listones, puede ser útil colocar un pequeño listón del ancho de la pieza para apoyarla.

- e. Soportes y contrapesos de la pila, cuando la madera es muy susceptible al alabeo se pueden colocar contrapesos encima de la capa superior de la pila, consistentes en prensas de resortes, piezas de durmientes en desuso o moldes de hormigón que aplican una presión entre 250 y 1000 kg/m², dependiendo de la especie de madera, el espesor del material y el grado de reducción de la deformación deseada. Estos contrapesos ayudan a estabilizar la carga, especialmente de las hileras superiores de madera, que es donde se presentan las torceduras.

3.5. Tiempo de secado

El tiempo requerido para secar una carga de madera depende de:

- El tipo de horno
- Las características de la madera
- El programa de secado empleado

La importancia en el tiempo de secado respecto al tipo de horno radica en que estos no son similares de acuerdo a sus características, a causa de la diferente eficiencia de sus equipos, por ejemplo, ventiladores y sistema de calefacción.

Las características de la madera son importantes para determinar el tiempo requerido de secado. Es de recordar que la madera de mayor densidad y peso específico necesita un período más largo de secado que una madera liviana y de rápido crecimiento. Al igual, una madera muy resinosa necesita mayor tiempo de secado que una menos resinosa. Por último, las características finales de las piezas de madera seca tienen gran diferencia considerando su uso final, pueden por ejemplo, permitirse más defectos de secado, rajaduras, manchas, etc., en la madera usada en cajones, que en la madera usada para paneles, muebles, destinada como elementos estructurales o para exportación.

Los programas de secado son procesos de secamiento que utilizan una tabla de temperaturas y humedad relativa, para diversas etapas del proceso de secado, desde el principio hasta el fin. Estos no son, ni pueden ser de aplicación universal, pues la humedad inicial y las características de secado de las diversas especies de madera varían según la localidad y la época. Por consiguiente, los programas de secado no deben ser considerados como una solución general sino simplemente como una regla básica que puede y debe ser frecuentemente modificada de acuerdo a las circunstancias locales, como tipo y eficiencia del secador, humedad inicial, densidad y otras condiciones.

Los programas de secado pueden basarse en el contenido de humedad o en el tiempo.

En el primer caso, se dirige de acuerdo a los cambios de humedad de las muestras colocadas en las pilas de madera seca. El contenido de humedad de las muestras se determina antes de empezar el proceso y en cada intervalo de tiempo elegido. En los programas basados en el tiempo, las condiciones del horno se cambian después del período que determinen dichos programas.

Aun cuando se utilicen programas de secado basados en el tiempo, el contenido de humedad inicial y final debe ser controlado mediante muestras.

3.6. Muestras para el control de secado

Para la medición de la variación de pérdida de humedad, no es posible pesar todas las piezas de madera que están dentro del secador. Por lo tanto se emplea el método de muestras testigo para representar el contenido de humedad de la madera en proceso de secado. Este método utiliza muestras cortas obtenidas a partir de piezas de madera, representativas y cuidadosamente seleccionadas.

Por lo general, las muestras se eligen durante la fase de apilado de la madera. La mayoría de tablonos, de los cuales se toman las muestras, deberán representar la madera más húmeda y lenta de secar. El número de muestras de secado a tomar es como mínimo cuatro por cada 20 m³ (8,500 pie-tabla), y de 10 a 12 muestras por cada carga de 100 m³ (42,000 pie-tabla) o más, del horno secador. El procedimiento para la preparación de las muestras testigo es el siguiente:

- a. Seleccionar las piezas de madera a utilizar del total de madera en el momento del apilado.

- b. Cortar una muestra testigo de 50 a 60 cm de largo, al centro de la pieza o al menos a partir de 30 a 40 cm de uno de los extremos, luego cortar, de los extremos de la muestra una sección de 2.5 cm
- c. Codificar apropiadamente la muestra testigo y las dos secciones.
- d. Inmediatamente pesar las secciones pequeñas en una balanza con una precisión mínima de 1 gramo y anotar el peso como peso inicial de las secciones (P_{Ai} y P_{Bi}). En caso de no poder pesarlas inmediatamente, se debe asegurar que las muestras no pierdan humedad desde su obtención hasta que son pesadas (se pueden guardar en bolsas plásticas o protegerlas con papel aluminio).
- e. La muestra testigo, una vez obtenidas las dos secciones de sus extremos, deben ser selladas con pintura en sus extremos y pesadas en una balanza con una precisión mínima de 50 gramos, anotando este peso como el peso inicial de la muestra testigo (P_{MTi}).
- f. Luego se colocan las muestras testigo dentro de la pila o paquete de madera a secar, en un lugar donde se asegure que su secado se realizara bajo las mismas condiciones del resto de madera dentro del horno.
- g. Las muestras o secciones pequeñas (A y B) deben ser colocadas dentro de un horno, con una temperatura máxima de 105 °C, hasta lograr peso constante, generalmente entre 12 y 24 horas. Este peso constante o final es el peso al horno (P_o) o peso anhidrido (0 % de contenido de humedad).

- h. El contenido de humedad de cada sección se calcula con la expresión:

$$CH = \frac{(P_{Ai} - P_{A0})}{P_{A0}} \times 100, \text{ (Ec. 3.1)}$$

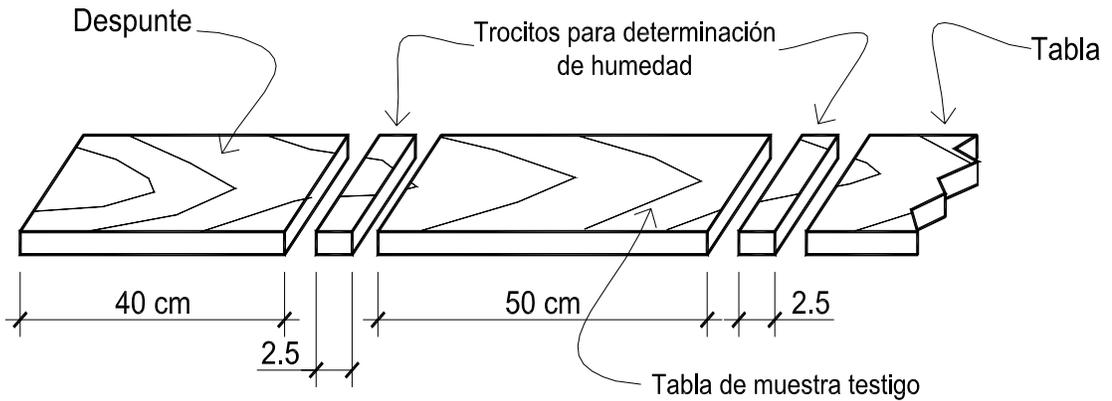
- i. Se promedian los valores de A y B para obtener el contenido de humedad inicial de la muestra testigo (CH_{MTi}).
- j. Se estima el peso seco anhidrido de la muestra testigo (P_{MT0}) utilizando el contenido de humedad inicial de la muestra testigo, CH_{MT} , (Ec. 3.1) y el peso inicial de la muestra testigo, P_{MTi} , (paso e), como sigue:

k.
$$P_{MT0} = \frac{(P_{MTi} \times 100)}{(100 + CH_{MTi})}, \text{ (Ec. 3.2)}$$

- l. Periódicamente sacar la muestra testigo del secador y pesarla, para obtener el contenido de humedad actual, y así de esta forma registrar la variación (pérdida) de humedad de la carga de madera conforme transcurre el proceso de secado.

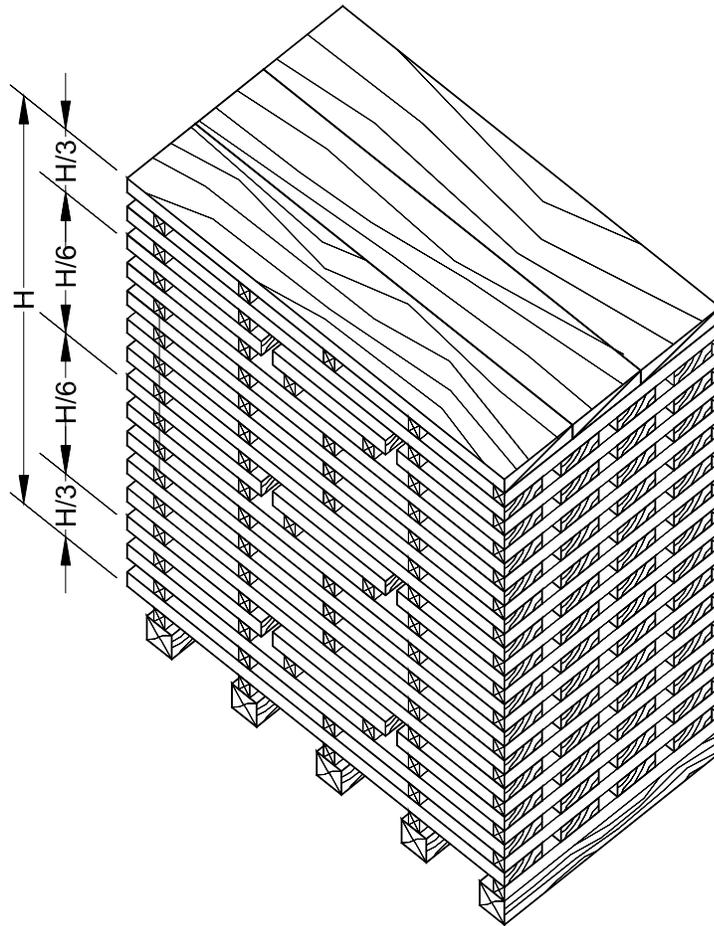
m.
$$CH_{ACTUAL} = \frac{(P_{MTactual} - P_{MT0})}{P_{MT0}} \times 100, \text{ (Ec. 3.3)}$$

Figura 18. Obtención de muestra para control de contenido de humedad



El número de muestras de secado y su localización dentro del horno varían con el tamaño, tipo y eficiencia de la cámara. Es importante que las muestras no impidan el flujo de aire y que éstas se ubiquen de modo que el aire circule en igual forma que en el resto de la pila. En vez de ubicar todas las muestras en los extremos, es conveniente localizar en uno o dos hileras al menos dos muestras, en frente y los lados, llenar el espacio entre el lado de la pila y las muestras de secado con piezas de relleno cortadas al mismo largo, de un material rechazado que esté disponible.

Figura 19. Localización de las muestras de control de humedad en una carga



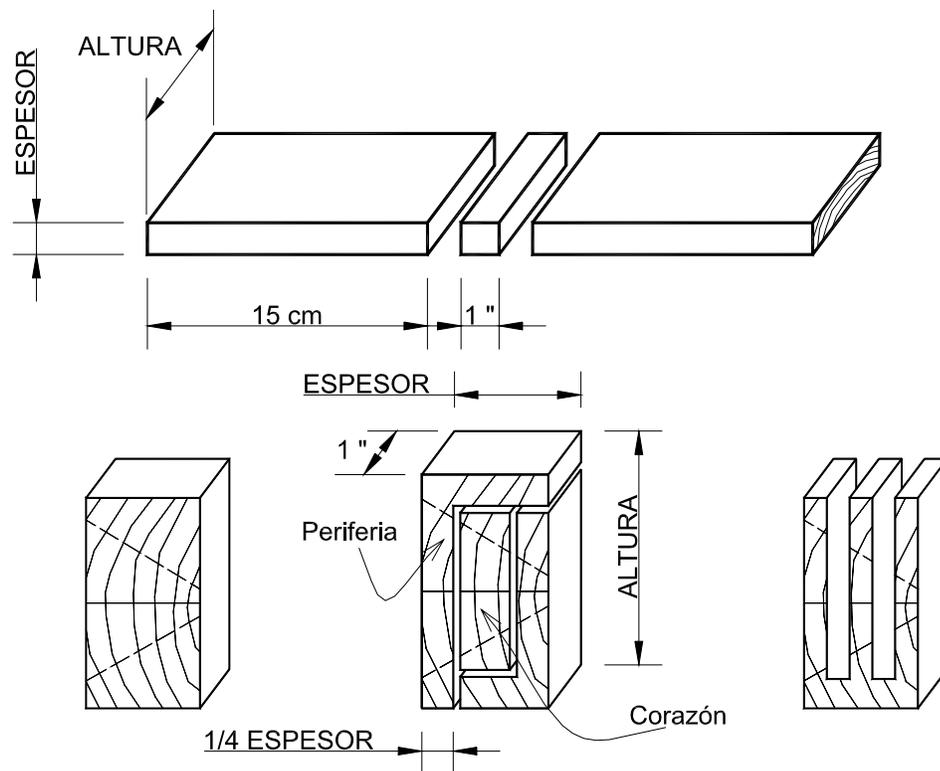
FUENTE: Documento 02064 CICON USAC. El secado de la madera. p 193

3.7. Pruebas finales de control de humedad

Las pruebas finales permiten determinar la distribución de la humedad periférica y del centro de la tabla, y los esfuerzos en las piezas de madera; estos ensayos deben realizarse periódicamente durante el proceso de secado.

Para determinar la variabilidad de la humedad entre la periferia y el centro de la tabla es necesario cortar secciones a una distancia de por lo menos 15 cm del extremo de las muestras de secado y a 60 cm del extremo de las tablas y tablones, el procesamiento de las probetas se detalla en la figura 20.

Figura 20. Método de corte de una sección de la tabla para determinar la distribución de humedad en la parte central y periférica



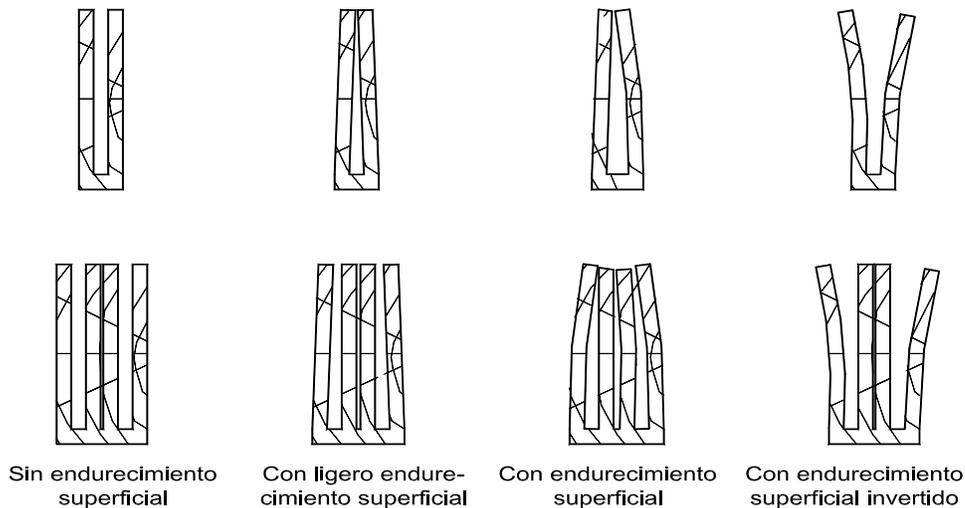
FUENTE: Silverio Viscarra. Guía practica para el secado de madera en hornos. p 13

Pesando cada sub-muestra, colocándolas en una estufa a 103 °C por un periodo de 24 horas y pesándolas nuevamente se determina el contenido de humedad con la siguiente relación:

$$CH = \frac{(\text{peso}_{\text{inicial}} - \text{peso}_{\text{secado}})}{\text{peso}_{\text{inicial}}} \times 100, \text{ (Ec. 3.4)}$$

A medida que progresa el secado de una pieza de madera, frecuentemente se desarrolla una condición de esfuerzo, como resultado del secado desigual y la contracción desigual correspondiente.

Figura 21. Método de corte de muestras de madera para determinar la distribución de esfuerzos



FUENTE: Documento 02064 CICON USAC. El secado de la madera. p 190

La condición del ejemplar de prueba se observa en el momento en que se corta. Entonces el ejemplar de prueba se debe secar a un contenido de humedad uniforme y se evalúa de nuevo. La observación importante es la última, que se hace después de 24 horas que las muestras se han mantenido bajo techo o en un cuarto y el contenido de humedad es uniforme a través de todo el ejemplar de prueba. Los diferentes esfuerzos se evalúan de acuerdo a las siguientes combinaciones⁹:

- a. Si los tejidos se voltean hacia fuera cuando se asieran, la superficie de la tabla está en tensión y el centro en compresión.
- Si los tejidos se voltean hacia adentro después del secado en el horno, esto es una indicación de un contenido de humedad comparativamente elevado al momento del asierre con la superficie más seca que el centro. Las fibras de la superficie han sido forzadas más allá de su límite proporcional en tensión perpendicular al hilo, y de acuerdo con ello han recibido una condición de expansión. Las fibras interiores pueden estar o no colocadas a compresión.
 - Si los tejidos continúan volteándose hacia fuera después del secado en el horno, esto es una indicación de que la madera está comparativamente seca, y de que en algún tiempo anterior las fibras de la superficie han absorbido lo suficiente, como para elevar su contenido de humedad a un valor arriba del de las fibras interiores. En el proceso, las fibras de la superficie se forzaron más allá de su límite proporcional en compresión y están en consecuencia fijadas a compresión. Esto se conoce como **endurecimiento superficial invertido**, y se debe evitar si es posible.
- b. Si los tejidos se voltean hacia adentro cuando se les asierra, el centro de la tabla está en tensión y la superficie en compresión.

- Si los tejidos se juntan después del secado en el horno, esto es una indicación de un contenido de humedad más elevado en el centro que en la zona exterior. La superficie ha quedado fijada a tensión. Esta condición de esfuerzo se conoce como **endurecimiento superficial**.

 - Si los tejidos se vuelven rectos o se voltean hacia fuera cuando se le seca en el horno: esto es una indicación de que en el momento en que se cortó el ejemplar, la madera estaba comparativamente seca, pero las zonas superficiales contenían más humedad que la interior. Los tejidos se comportan de esta manera cuando las fibras superficiales de la madera comparativamente seca se vuelven húmedas -generalmente con la lluvia o la nieve- o después de su exposición a humedades relativas, que aumentan el contenido de humedad de las fibras superficiales hasta un valor mayor que el del interior. Si los tejidos se voltean hacia fuera, la madera ha recibido un endurecimiento superficial invertido.
- c. Si los tejidos permanecen rectos cuando se les asierra, la madera está libre de esfuerzo.
- Si los tejidos permanecen rectos cuando se les seca en el horno, la madera estaba verde-pasto o tenía un contenido de humedad comparativamente bajo en el momento de cortarla; la distribución de la humedad era uniforme. La madera está libre de esfuerzos.

- Si los tejidos se voltean hacia adentro después de que se les seca en el horno: esto es una indicación de que en el momento de que la pieza se aserró, había más humedad en el centro que en las fibras exteriores. Las fibras de la superficie están fijadas en condiciones de expansión y el material mostrará evidencia de endurecimiento superficial cuando se seca uniformemente.

- Si los tejidos se voltean afuera después de que se les ha secado en horno: esto es una indicación de que en el momento en que el ejemplar fue cortado, el centro está más seco que la zona exterior. Esto es evidencia de la condición de compresión en las fibras exteriores y del endurecimiento superficial invertido. Esta condición se crea debido a que las fibras superficiales algunas veces retienen una cantidad excesiva de humedad, la cual se pierde subsecuentemente por el secado en el horno a un contenido de humedad uniforme.

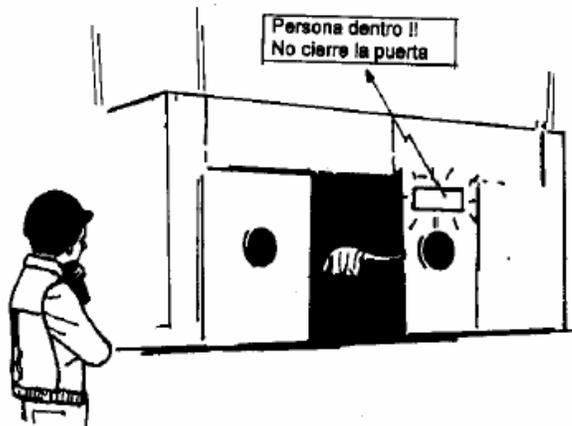
3.8. Medidas de seguridad en hornos¹⁰

El uso de horno para secar madera conlleva una gran responsabilidad, no solo para el operador, sino para todas aquellas personas que intervienen para que el proceso se desarrolle adecuadamente. Al igual que cualquier maquinaria, para el empleo de hornos secadores es necesario tomar en cuenta varias medidas de seguridad, a continuación se presentan varias de éstas:

- a. Antes de ingresar a un horno donde se está secando la madera, desactivar los ventiladores, vaporizadores y radiadores.

- b. Dejar enfriar un poco el horno si está operando a elevadas temperaturas, antes de ingresar en él.
- c. De ser necesario ingresar al horno que tiene en operación los radiadores, vaporizadores y ventiladores, mantener una persona afuera para que proporcione asistencia inmediata, si es requerida. Si no existe una persona cercana, colocar un letrero en la puerta con la leyenda "Persona dentro, no cierre la puerta".

Figura 22. Medidas de seguridad en hornos

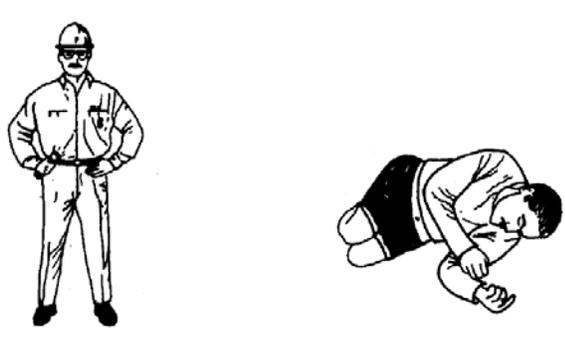


FUENTE: Silverio Viscarra. Guía práctica para el secado de madera en hornos. p 21

- d. Operar con cuidado la apertura y cierre de los portones del horno. Si son muy pesados emplear dos o más hombres para abrirlos.
- e. Siempre llevar consigo una linterna cuando se ingresa a un horno. Constatar que la linterna funcione correctamente. Nunca emplear cerillos o encendedor de llama.

- f. Nunca ingresar a un horno sin la protección del cuerpo y la cabeza, cuando la temperatura es 55 °C o más. No deben ingresar al horno personas afectadas del corazón o de las vías respiratorias.

Figura 23. Medidas de seguridad en hornos

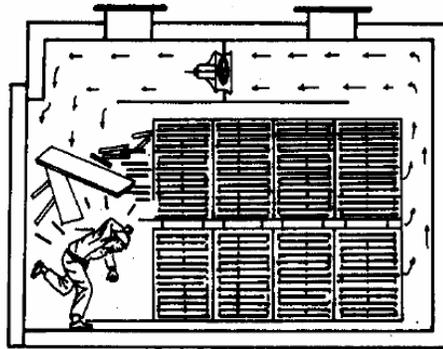


FUENTE: Silverio Viscarra. Guía practica para el secado de madera en hornos. p 21

- g. Implementar pasadores de las puertas de acceso al horno, que puedan ser operados por dentro y fuera. Reparar de inmediato toda falla en los pasadores. Nunca use trancas o palos para mantener una puerta cerrada. Implementar una señal de aviso que pueda ser utilizada si una persona está accidentalmente encerrada.
- h. Apagar los ventiladores cuando se están lubricando o inspeccionando. Colocar el interruptor en OFF y un letrero que diga "No operar los ventiladores, persona inspeccionando".
- i. Tener cuidado al caminar en el piso cercano a los ventiladores por el derrame de aceite que puede ocasionar resbalones.
- j. Tener expeditas las vías de acceso a los ventiladores.

- k. Tener cuidado con objetos que se empujen o que puedan caer cuando se está dentro del horno.

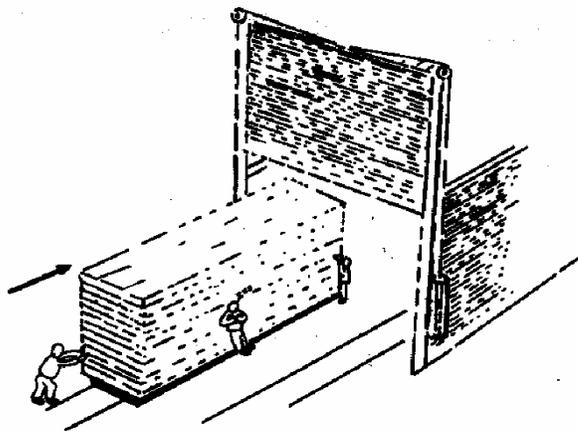
Figura 24. Medidas de seguridad en hornos



FUENTE: Silverio Viscarra. Guía practica para el secado de madera en hornos. p 22

- l. Cuando la carga se está empujando hacia adentro o afuera del horno, las personas deben pisar firmemente para evitar resbalones y ser apretadas por la carga.

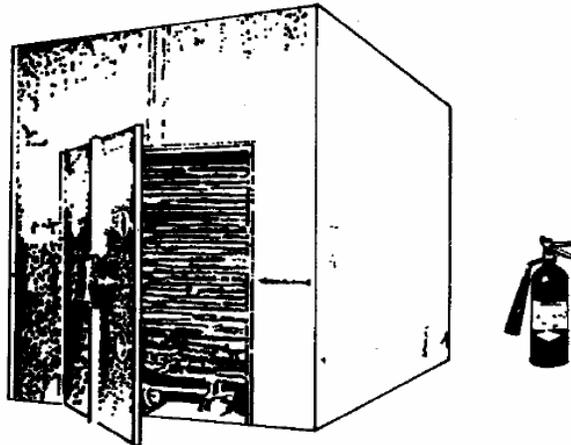
Figura 25. Medidas de seguridad en hornos



FUENTE: Silverio Viscarra. Guía practica para el secado de madera en hornos. p 23

- m. Mantener el horno y sus alrededores libre de escombros que puedan originar tropiezos.
- n. Mantener los circuitos eléctricos en buenas condiciones.
- o. Mantener todas las partes móviles bien lubricadas.
- p. Tener cerca un extinguidor de fuego en buenas condiciones de funcionamiento.

Figura 26. Medidas de seguridad en hornos



FUENTE: Silverio Viscarra. Guía practica para el secado de madera en hornos. p 24

- q. Instalar un sistema de rociado de agua en el horno, para apagar incendios.

4. OTRAS METODOLOGÍAS

4.1. Secado natural acelerado¹¹

Este método consiste en sumergir las maderas en agua con el fin de que ésta se introduzca en lugar de savia, así posteriormente, se consigue una más rápida evaporación, que significa una disminución considerable del tiempo de secado.

Para facilitar la desecación de la savia y la eliminación de las sales, se sumergen las maderas en agua, ésta atraviesa por ósmosis los tejidos a través de los vasos y disuelve la savia, ocupando un sitio. Este tratamiento oscurece ligeramente el color de la madera, pero reduce en un tercio el tiempo necesario para el secado. En los aserraderos, antes de aserrar los troncos, los tienen un periodo de tiempo sumergidos en el mar. La madera hidratada o humedecida por la acción de la inmersión, lluvias, etc., se seca rápidamente, eliminando el agua absorbida.

La madera verde, húmeda o recién cortada contiene la savia que es preciso extraer, por eso con la inmersión de los troncos ya sea en lagos, ríos o corrientes de agua se facilita su disolución y eliminación.

Debe tenerse en cuenta que cuando las maderas están secas, no conviene esparcirlas, sino rehacer las pilas, ya que un exceso de ventilación podría originar grietas. Por otro lado, los listones de separación convienen que sean de madera blanda como el pino y nunca de roble para evitar que las piezas se manchen.

4.2. Secado en interiores¹²

El secado al aire libre muchas veces no es suficiente si la madera se va a usar en interiores, pero se puede preparar bien la “madera para acabados” al secarla durante más tiempo en espacios deshumidificados o calentados tales como el sótano, garaje, bodega o un secador solar hecho en casa.

Una cámara de secado en hornos es aquélla en la que se puede regular la temperatura del aire y la humedad relativa. Al controlar el medio ambiente, la madera se puede secar a la velocidad óptima: lentamente para evitar la desviación y rajaduras, pero lo suficientemente rápido para eliminar el agua en forma económica y evitar el deterioro y manchas de la madera.

Desafortunadamente, el costo de un horno de secado puede ser prohibitivo para un pequeño aserrador de madera o para el aficionado. A continuación se dan varias alternativas para que el pequeño aserrador o el aficionado puedan secar la madera en el hogar.

Secadero de hogar o granja: El secado en interiores realizado en el hogar o la granja es muy sencillo. Por lo general, se compra la madera verde de un aserradero a principios de la primavera, luego se apila correctamente en el patio trasero durante el resto de la primavera y el verano. Después, se pasa la madera a un garaje, sótano o granero con calefacción y se deja allí hasta la próxima estación de calor. Al principio, el área de almacenamiento está húmeda, pero se va secando gradualmente a finales del otoño cuando las temperaturas son más bajas que las del área interior calentada.

A inicios de febrero, la humedad del área de almacenamiento llega a su punto mínimo y el contenido de humedad de la superficie de la madera (o coraza) es muy bajo, mientras que se sigue secando su corazón, que sigue húmedo. En marzo, aumenta gradualmente la humedad y la coraza reabsorbe otra vez parte del vapor de agua del aire circundante. Para finales de la primavera, las tablas se habrán secado de manera uniforme a menos de 10 por ciento de contenido de humedad.

Secadero hecho en casa: Los aficionados pueden construir un pequeño secadero hecho en casa para secar pequeñas cantidades de madera nativa para uso personal. El secado al sol puede ser de dos a tres veces más rápido que el secado al aire libre.

En el secadero, se capta el calor proveniente del sol en ventanas de un grosor igual, dispuestas del lado orientado hacia el sur del horno. El colector solar está formado por una superficie de cerca de 48 pies cuadrados de vidrio. Los cuatro colectores de calor solar se fabrican de láminas de metal negro sujetadas a una tabla maciza. Los colectores de calor van sujetos cerca de la parte superior del marco de la ventana. Esto permite que el aire caliente fluya del colector de calor hacia la secadora.

Figura 27. Secadero de calentamiento solar. (a) Vista frontal del lado sur de secadero solar de madera aserrada. (b) Vista lateral este del secadero solar de madera aserrada que muestra la puerta principal de carga y descarga y el pequeño acceso al área del colector



(a)



(b)

FUENTE: Robert H. Mills. Procesos de secado para evitar defectos en la madera. p 16

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Muestras

5.1.1. Obtención de muestras

La norma ASTM D-143 establece que las probetas de ensayo deben estar limpias y libres de defectos. Por tal razón, las piezas de madera utilizadas para la obtención de muestras fueron seleccionadas cuidadosamente, desechando aquellas que presentaban características que limitaban su uso en la obtención de las probetas. Todas las muestras utilizadas fueron cepilladas y cortadas de acuerdo a las exigencias normadas para cada ensayo.

Para cumplir con los objetivos, se establecieron tres tipos de probetas de ensayo, las primeras fueron secadas al aire libre, las segundas en horno domestico y las ultimas conservaron su humedad de corte (madera verde).

5.1.2. Secado de muestras

El secado al aire libre se mantuvo durante 166 días, tiempo en el cual se estimó que el contenido de humedad de las probetas se encontraba abajo del punto de saturación de fibra. Este proceso se desarrolló bajo condiciones estrictas de ventilación natural, protección de fuentes de humedad y evitando la exposición directa al sol.

El secado en horno doméstico se desarrolló a una temperatura de 80°C durante un período de 14 horas. Tiempo necesario para que las probetas alcanzaran un peso aproximadamente igual a las secadas al aire libre.

5.2. Ensayos de laboratorio

5.2.1. Material utilizado¹³

La madera utilizada es del árbol *Pinus oocarpa* Schiede (Pino Colorado). Es una especie nativa de la familia Pinaceae, alcanza de 14 a 45 metros de altura y su fuste es recto y cilíndrico. Crece en bosque húmedo Sub-tropical (templado), bosque muy húmedo Sub-tropical (frío) y bosque húmedo montano bajo Sub-tropical, en altitudes entre 500 a 2500 msnm. La madera es moderadamente resistente a la pudrición blanca y café y resistente a termitas; pero susceptible al hongo de la mancha azul. Su uso es para construcción en general, pisos o sótanos, postes, pilotes y durmientes (tratados), puertas, entarimados, paredes interiores, entre otros.

5.2.2. Equipo utilizado

Las dimensiones de las probetas fueron tomadas con un vernier digital marca MITUTOYO, con una precisión milimétrica.

El ensayo de flexión se desarrolló en una máquina universal de carga, marca TINUS OLSEN, con una capacidad máxima de 150,000 Kg Este equipo es controlado por el Software # 194,313 – RO, UTM for Windows versión 6.03.30. La precisión de la máquina depende de la escala programada.

Los ensayos de compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra y dureza se efectuaron en la máquina universal de carga marca BALDWIN LIMA-HAMILTON, con una capacidad máxima de 60,000 Kg, operada manualmente.

Dependiendo del tipo de ensayo, fue necesario el uso de accesorios especiales, entre los que destacan: dispositivo de madera para transmitir carga (ensayo de flexión estática); apoyo articulado (compresión y dureza); deflectómetro y plancha metálica para la aplicación de carga (ensayo de compresión perpendicular); dispositivo para penetración (dureza).

5.2.3. Descripción de ensayos

5.2.3.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera se calcula como un porcentaje del peso del agua que contiene, respecto al peso del material seco. La muestra se selecciona luego de cada prueba, utilizando un residuo del material ensayado al que se le quitan todas las astillas. La muestra de madera se pesa en la condición en que se encuentra para obtener el peso inicial, el peso seco se determina después de exponer la muestra a una temperatura de 103 °C a 105 °C, hasta alcanzar un peso constante. Esto normalmente toma de 12 a 24 horas. El porcentaje de humedad se determina aplicando la siguiente formula:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100, \text{ (Ec. 5.1)}$$

5.2.3.2. Contracción radial y tangencial

Por contracción se entiende a la disminución de las dimensiones radial, tangencial o del volumen de la pieza, desde el estado húmedo hasta un nivel de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra. Se expresa como un porcentaje, respecto a la dimensión inicial o del material húmedo.

$$\text{Contracción (tangencial o radial)} = \frac{\text{Long. verde} - \text{Long. seca}}{\text{Long. verde}} \times 100, \text{ (Ec. 5.2)}$$

Para determinar la contracción radial y tangencial se utilizan probetas que midan 2.5 cm x 2.5 cm x 10 cm Ésta se pesa cuando esta verde y posteriormente cuando ya se ha secado al horno. Las medidas de las probetas se hacen en dos condiciones, secas al aire libre y en horno.

5.2.3.3. Peso específico

Es la relación existente entre el peso de la madera y su volumen aparente, tomando en cuenta el mismo grado de humedad. Las dimensiones de las probetas son de 5 cm x 5 cm x 15 cm El peso específico puede clasificarse de la siguiente manera:

$$\text{Peso específico seco (P.E.S.)} = \frac{\text{peso seco al horno}}{\text{volumen seco al horno}} \quad \text{(Ec. 5.3)}$$

$$\text{Peso específico al aire (P.E. al aire)} = \frac{\text{peso seco al aire}}{\text{volumen seco al aire}} \quad \text{(Ec. 5.4)}$$

$$\text{Peso específico verde (P.E.V.)} = \frac{\text{peso verde}}{\text{volumen verde}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

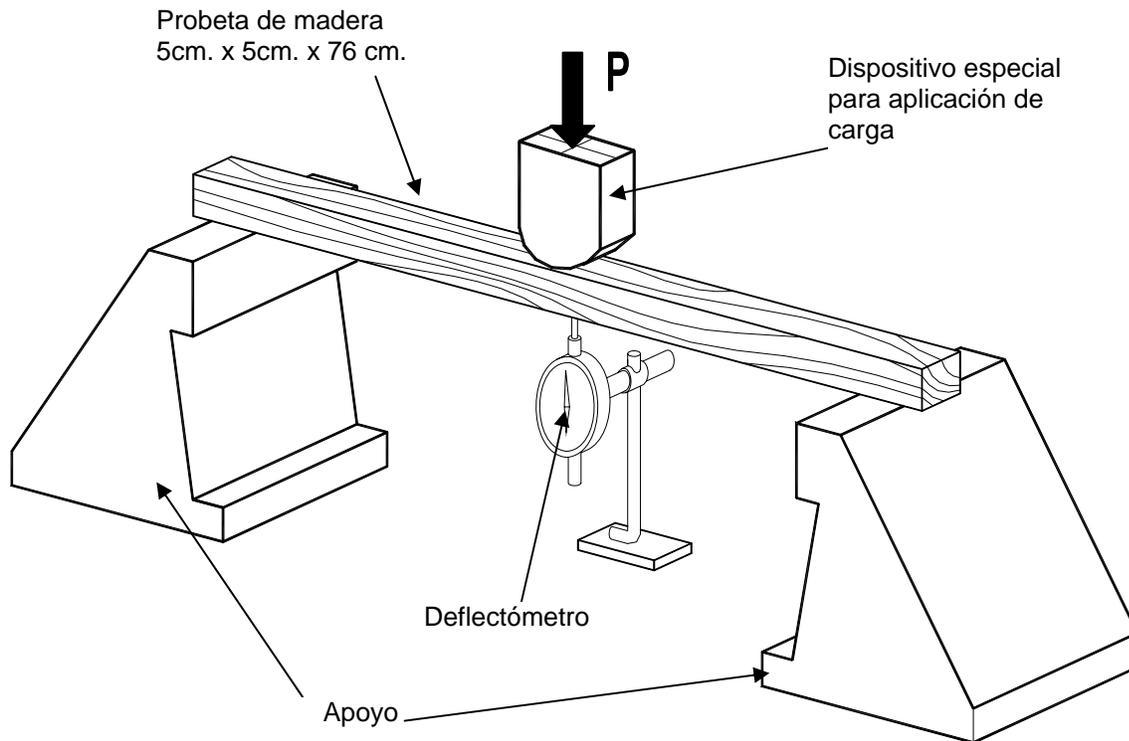
5.2.3.4. Flexión estática

La prueba de flexión estática para piezas de madera pequeñas y limpias (ASTM D-143) consiste en la aplicación de una carga al centro del claro libre de una probeta de madera apoyada en sus extremos. La pieza es flexionada a un valor prescrito y se hacen observaciones coordinadas de cargas y deflexiones hasta que ocurre la ruptura. La probeta utilizada para dicho ensayo debe ser de 5 cm x 5 cm x 76 cm

Al ser colocada la probeta en la máquina de ensayo, se centra la carga, se mide la luz entre soportes que debe ser de 70 cm. La carga se transmite a través de una pieza de forma apropiada y hecha de madera dura, colocándose la muestra de manera que la carga le pueda ser aplicada concentrada, sobre su cara tangencial, y continuamente durante todo el ensayo, a una velocidad de 2.5 mm. /min.

Luego del ensayo se anotan todos los detalles que se consideren importantes como el tipo de falla y se determina el contenido de humedad de la pieza. De acuerdo a los resultados obtenidos, se plotea una gráfica de carga-deflexión para determinar el límite elástico, esto está marcado al trazar una tangente en la curva esfuerzo-deformación, cuando dicha tangente se separa de la curva.

Figura 28. Ensayo de flexión estática



Las propiedades mecánicas de flexión (esfuerzo máximo o módulo de rotura y módulo de elasticidad a flexión) se determinan de la siguiente manera:

- Para calcular el esfuerzo máximo o módulo de rotura se hace uso de una fórmula que sólo es válida en el rango elástico del material:

$$F_u = \frac{3}{2} \times \frac{P \times L}{b \times h^2}, \text{ (Ec. 5.6)}$$

Donde:

F_u = esfuerzo máximo de flexión, (Kg /cm²)

P = carga última, (Kg)

L = longitud libre, (70 cm)

b = base de sección de probeta, (Aprox. 5 cm)

h = altura de sección de probeta, (Aprox. 5 cm)

- El módulo de elasticidad a flexión se determina con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{P_{LE} \times L^3}{48 \times \varepsilon \times I}, \text{ (Ec. 5.7)}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad a flexión, (Kg /cm²)

P_{LE} = cualquier carga abajo del límite elástico, (Kg)

L = longitud libre, (70 cm)

ε = deformación para la carga P_{LE} , (cm)

I = momento de inercia = $1/12 \times b \times h^3$, para sección cuadrada

b = base de la sección de la probeta, (Aprox. 5 cm)

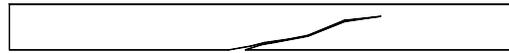
h = altura de la sección de la probeta, (Aprox. 5 cm)

Las fallas que presente la muestra en este tipo de ensayo, se describen y clasifican de acuerdo con la apariencia que presente la zona de fractura y la forma de desarrollo de la falla. Los tipos de falla más comunes para el ensayo de flexión estática son: tensión simple, tensión pura, corte transversal a la fibra, compresión, tensión astillante y corte horizontal.

Figura 29. Varios modos de falla que se dan en la prueba de flexión estática



(a) Tensión simple
(Vista lateral)



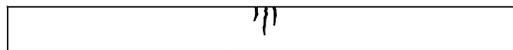
(b) Tensión en fibra cruzada
(Vista lateral)



(c) Tensión astillada
(Vista superficie a tensión)



(d) Tensión de falla abrupta
(Vista superficie a tensión)



(e) Compresión
(Vista lateral)



(f) Corte horizontal
(Vista lateral)

FUENTE: Iván Gálvez Aqueche. Propiedades físico mecánicas de la madera de tres especies forestales del norte de Guatemala. p 16

5.2.3.5. Compresión paralela a la fibra

Las dimensiones de la probeta para este ensayo (ASTM D-143) son de 5cm x 5cm x 20cm, debe tenerse cuidado que los planos de los cortes hechos en los extremos de la pieza queden paralelos y formen ángulo recto con las caras longitudinales, esto ayudara a centrar la carga y evitar que la probeta se ladee.

Durante el ensayo, la carga se aplica en forma continua a una velocidad de 0.003 cm, por cm por cada cm de longitud de la muestra por minuto. Deben medirse las deformaciones en intervalos específicos usando un deformómetro especial para la prueba que se ajusta a la probeta. Para obtener la deformación en mm. la aproximación del aparato se multiplica por la lectura. Además se determinan la cara y la deflexión para la primera falla, la carga máxima y puntos de cambio repentino. Es importante hacer un bosquejo de la falla, anotando sus características y tipo. Finalmente se calcula el contenido de humedad de la probeta por medio de una muestra de aproximadamente 2.5 cm de longitud cortada cerca de la zona de falla.

Con los resultados de la prueba se determina el esfuerzo de compresión paralelo último utilizando la siguiente fórmula:

$$F_c = \frac{P}{A}, \text{ (Ec. 5.8)}$$

Donde:

F_c = esfuerzo de compresión paralelo último, (Kg /cm²)

P = carga última, (Kg)

A = área de compresión, (aprox. 25 cm².)

Los tipos de fallas más comunes en ensayos de compresión paralela son los siguientes:

Aplastamiento: Este tipo de falla se presenta cuando el plano de ruptura es aproximadamente horizontal.

Falla en forma de cuña: La dirección de la grieta en el plano radial o tangencial puede ser visible.

Corte: Se presenta cuando el plano de ruptura se encuentra aproximadamente a 45 grados del plano horizontal.

Rajadura: Generalmente ocurre cuando existen defectos internos en la probeta.

Compresión y corte paralelo a la fibra: Este tipo de falla ocurre en probetas de fibra cruzada y son consecuencia de no cumplir con las especificaciones que definen las características de las probetas.

Final enrollado: Este tipo de falla es asociado con el exceso de humedad en los bordes de la probeta y al corte inapropiado de la misma.

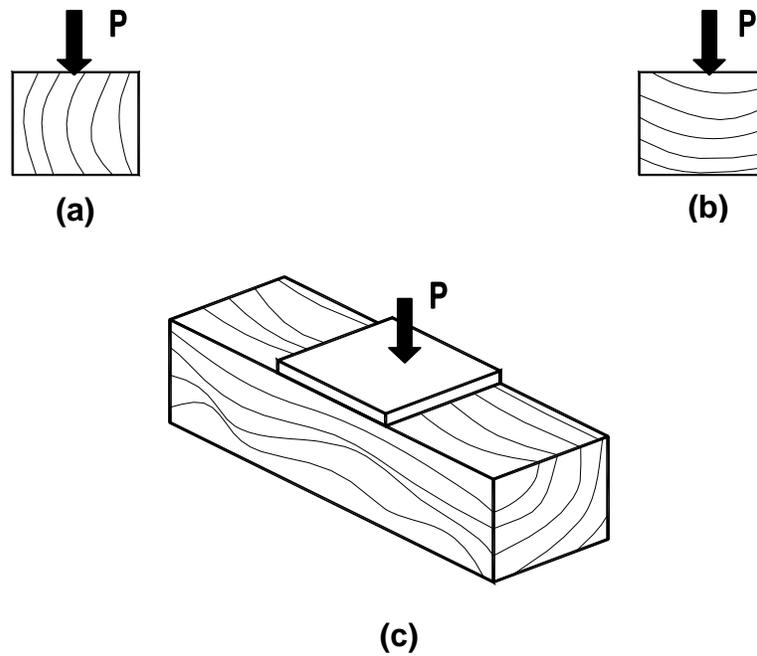
5.2.3.6. Compresión perpendicular a la fibra

Las dimensiones de la probeta para este ensayo son de 5cm x 5cm x 15cm, y los anillos de crecimiento deben estar bien definidos en las caras laterales. La carga se aplica a través de una plancha metálica de 5cm de ancho, colocada sobre una de las caras longitudinales y equidistantes de los extremos.

La deformación se mide entre las superficies cargadas, las deflexiones se leen con aproximación de 0.002 cm hasta alcanzar una deformación de 2.5 mm., después de lo cual se suspende la prueba.

La carga para la deformación de 2.5 mm., se toma como la carga máxima, a menos que la falla ocurra antes de esa deformación. Para obtener el contenido de humedad de la pieza se utiliza un trozo de 2.5 cm de longitud, cortado cerca de la parte fallada.

Figura 30. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra. (a) Ensayo tangencial. (b) Ensayo radial. (c) Aplicación de carga



Con la determinación de la carga máxima se obtiene el esfuerzo máximo a compresión perpendicular con la siguiente expresión:

$$F_c = \frac{P}{A}, \text{ (Ec. 5.9)}$$

Donde:

F_c = esfuerzo máximo a compresión perpendicular, (Kg /cm²)

P = carga última o carga para una deformación de 2.5 mm., (Kg)

A = área de esfuerzo, (aprox. 25 cm²)

5.2.3.7. Dureza

Para el ensayo de Penetración o dureza se utiliza una bola o munición de 1.13 cm (0.44 pulg.) de diámetro, la probeta es de 5cm x 5cm x 15cm La carga necesaria para que la bola penetre dentro de la probeta hasta la mitad de su diámetro, se toma como la resistencia de la madera a la penetración. La carga se aplica uniforme y constantemente a una velocidad de 6 mm. por minuto.

Se hacen 2 penetraciones sobre una misma cara tangencial, 2 sobre una misma cara radial y una en cada extremo de la probeta. Los puntos de aplicación de la carga sobre la cara radial o tangencial deben estar suficientemente separados para obtener un buen promedio, pero distanciados de los extremos para evitar rajaduras o astillamientos. Para la determinación del contenido de humedad de la muestra se corta un trozo de 2.5cm de longitud cerca de la parte fallada.

5.2.4. Procedimientos de ensayo

a. Flexión estática

- i. Determinación de las dimensiones reales de la probeta

- ii. Determinación de las distancias de los puntos de aplicación de carga.
- iii. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo
- iv. Aplicación de carga
- v. Registro de datos de ensayo
- vi. Identificación del tipo de falla
- vii. Remover la muestra de la máquina de ensayo

b. Compresión paralela a la fibra

- i. Determinación de las dimensiones reales de la probeta
- ii. Colocación de accesorios para efectuar el ensayo
- iii. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo
- iv. Aplicación de carga
- v. Registro de datos de ensayo
- vi. Identificación del tipo de falla
- vii. Remover la muestra de la máquina de ensayo

c. Compresión perpendicular a la fibra

- i. Determinación de las dimensiones reales de la probeta
- ii. Colocación de accesorios para efectuar el ensayo
- iii. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo
- iv. Colocación del deflectómetro
- v. Aplicación de carga
- vi. Registro de datos de ensayo
- vii. Descargar máquina de ensayo: probeta, accesorios y deflectómetro

d. Dureza

- i. Determinación de las dimensiones reales de la probeta
- ii. Colocación de accesorios para efectuar el ensayo
- iii. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo
- iv. Colocación del deflectómetro
- v. Aplicación de carga
- vi. Registro de datos de ensayo
- vii. Descargar máquina de ensayo: probeta y accesorios

6. RESULTADOS

6.1. Obtención de las características físicas

Los ensayos para determinar las características físicas fueron desarrollados por la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, obteniendo los siguientes resultados:

6.1.1. Contenido de humedad

Madera verde	=	36.98 %
Madera seca al aire	=	12.81%
Madera seca en horno	=	7.04 %

6.1.2. Contracción radial y tangencial

Para determinar estas propiedades se utiliza la ecuación Ec. 5.2

$$\text{Contracción (tangencia o radial)} = \frac{\text{Long. verde} - \text{Long. seca}}{\text{Long. verde}} \times 100$$

a. Madera seca al aire libre

Contracción radial

Longitud antes de secado = 2.55 cm

Longitud después de secado = 2.49 cm

$$\text{Contracción radial} = \frac{2.55 \text{ cm.} - 2.49 \text{ cm.}}{2.55 \text{ cm.}} \times 100 = 2.35\%$$

Contracción Tangencial

Longitud antes de secado = 2.42 cm

Longitud después de secado = 2.36 cm

$$\text{Contracción tangencial} = \frac{2.42 \text{ cm.} - 2.36 \text{ cm.}}{2.42 \text{ cm.}} \times 100 = 2.48\%$$

b. Madera seca en horno

Contracción radial

Longitud antes de secado = 2.52 cm

Longitud después de secado = 2.40 cm

$$\text{Contracción radial} = \frac{2.52 \text{ cm.} - 2.40 \text{ cm.}}{2.52 \text{ cm.}} \times 100 = 4.76\%$$

Contracción Tangencial

Longitud antes de secado = 2.51 cm

Longitud después de secado = 2.37 cm

$$\text{Contracción tangencial} = \frac{2.51 \text{ cm.} - 2.37 \text{ cm.}}{2.51 \text{ cm.}} \times 100 = 5.58\%$$

6.1.3. Peso específico

Peso específico verde = 1.03 g/cm³

Peso específico al aire = 0.42 g/cm³

Peso específico al horno = 0.63 g/cm³

6.2. Obtención de las propiedades mecánicas

Los ensayos para determinar las propiedades mecánicas fueron desarrollados con la colaboración de la Sección de Metales del Centro de Investigaciones de Ingeniería, obteniendo los siguientes resultados:

6.2.1. Flexión estática

El comportamiento de la probeta durante el ensayo se refleja en una gráfica esfuerzo-deformación proporcionada por el computador. Este también proporciona un listado de los valores de la carga aplicada y la deformación alcanzada en ese instante (ver anexo).¹⁴

Estas herramientas son de gran valor para determinar la carga máxima aplicada (P_{max}) y cualquier carga bajo el límite elástico (P_{LE}) con su respectiva deformación (ϵ), datos necesarios para calcular las propiedades mecánicas a flexión de la muestra (esfuerzo máximo y módulo de elasticidad). Estas propiedades se determinan utilizando las ecuaciones Ec. 5.6 y Ec. 5.7 de la siguiente manera:

a. Madera verde

Probeta 1

Base (b) = 5.28 cm

Altura (h) = 5.29 cm

Luz (L) = 70.00 cm

Pmax. = 846 Kg

P_{LE} = 231 Kg

ε = 0.115 cm

i. Esfuerzo máximo

$$F_u = \frac{3}{2} \times \frac{P \times L}{b \times h^2}$$

$$F_u = \frac{3}{2} \times \frac{846 \text{kg.} \times 70.00 \text{cm}}{5.28 \text{cm.} \times (5.29 \text{cm.})^2} = 601.19 \text{ kg/cm}^2$$

ii. Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{P_{LE} \times L^3}{48 \times \varepsilon \times I}$$

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 5.28 \times (5.29)^3 = 65.14 \text{cm}^4$$

$$E = \frac{231 \text{kg.} \times (70.00 \text{cm})^3}{48 \times 0.115 \text{cm} \times 65.14 \text{cm}^4} = 220,353.15 \text{ kg/cm}^2$$

Probeta 2

Base (b) = 5.05 cm

Altura (h) = 5.23 cm

Luz (L) = 70.00 cm

Pmax. = 856.00 Kg

P_{LE} = 231 Kg

$$\varepsilon = 0.1189 \text{ cm}$$

$$i. \quad F_u = \frac{3}{2} \times \frac{856 \text{ kg} \cdot 70.00 \text{ cm}}{5.05 \text{ m} \cdot (5.23 \text{ cm})^2} = 650.68 \text{ kg/cm}^2$$

$$ii. \quad I = \frac{1}{12} \times 5.05 \times (5.23)^3 = 60.20 \text{ cm}^4$$

$$E = \frac{272 \text{ kg} \cdot (70.00 \text{ cm})^3}{48 \times 0.1189 \text{ cm} \times 60.20 \text{ cm}^4} = 271,546.02 \text{ kg/cm}^2$$

Promedio

$$F_{u_1} = 601.19 \text{ kg/cm}^2 ; E_1 = 220,353.15 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{u_2} = 650.68 \text{ kg/cm}^2 ; E_2 = 271,546.02 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_u = 625.94 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 245,949.59 \text{ Kg/cm}^2$$

b. Madera seca al aire

Probeta 1

$$\text{Base (b)} = 5.04 \text{ cm}$$

$$\text{Altura (h)} = 5.13 \text{ cm}$$

$$\text{Luz (L)} = 70.00 \text{ cm}$$

$$P_{\text{max.}} = 806 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{LE}} = 241 \text{ Kg}$$

$$\varepsilon = 0.1969 \text{ cm}$$

$$i. \quad F_u = \frac{3}{2} \times \frac{806 \text{kg} \cdot 70.00 \text{cm}}{5.04 \text{cm} \cdot (5.13 \text{cm})^2} = 638.06 \text{ kg/cm}^2$$

$$ii. \quad I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 5.04 \times (5.13)^3 = 56.70 \text{cm}^4$$

$$E = \frac{241 \text{Kg} \cdot (70.00 \text{cm})^3}{48 \times 0.1969 \text{cm} \times 56.70 \text{cm}^4} = 154,255.67 \text{ Kg/cm}^2$$

Probeta 2

Base (b) = 5.06 cm

Altura (h) = 5.07 cm

Luz (L) = 70.00 cm

Pmax. = 958 Kg

P_{LE} = 242 Kg

ε = 0.1685 cm

$$i. \quad F_u = \frac{3}{2} \times \frac{958 \text{kg} \cdot 70.00 \text{cm}}{5.06 \text{m} \cdot (5.07 \text{cm})^2} = 773.37 \text{ kg/cm}^2$$

$$ii. \quad I = \frac{1}{12} \times 5.06 \times (5.07)^3 = 54.95 \text{ cm}^4$$

$$E = \frac{242 \text{kg} \cdot (70.00 \text{cm})^3}{48 \times 0.1685 \text{cm} \times 54.95 \text{cm}^4} = 186,767.22 \text{ Kg/cm}^2$$

Promedio

$F_{u_1} = 638.06 \text{ kg/cm}^2$; $E_1 = 154,255.67 \text{ Kg/cm}^2$

$F_{u_2} = 773.37 \text{ kg/cm}^2$; $E_2 = 186,767.22 \text{ Kg/cm}^2$

$$F_u = 705.72 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 170,511.45 \text{ Kg/cm}^2$$

c. Madera seca en horno

Probeta 1

$$\text{Base (b)} = 4.92 \text{ cm}$$

$$\text{Altura (h)} = 4.98 \text{ cm}$$

$$\text{Luz (L)} = 70.00 \text{ cm}$$

$$P_{\text{max.}} = 913 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{LE}} = 241 \text{ Kg}$$

$$\varepsilon = 0.1255 \text{ cm}$$

$$i. \quad F_u = \frac{3}{2} \times \frac{913 \text{ kg.} \times 70.00 \text{ cm}}{4.92 \text{ cm.} \times (4.98 \text{ cm.})^2} = 785.66 \text{ kg/cm}^2$$

$$ii. \quad I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 4.92 \times (4.98)^3 = 50.64 \text{ cm}^4$$

$$E = \frac{241 \text{ Kg.} \times (70.00 \text{ cm})^3}{48 \times 0.1255 \text{ cm} \times 50.64 \text{ cm}^4} = 270,977.05 \text{ Kg/cm}^2$$

Probeta 2

$$\text{Base (b)} = 5.04 \text{ cm}$$

$$\text{Altura (h)} = 5.00 \text{ cm}$$

$$\text{Luz (L)} = 70.00 \text{ cm}$$

$$P_{\text{max.}} = 971.0 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{LE}} = 241 \text{ Kg}$$

$$\varepsilon = 0.1377 \text{ cm}$$

$$\text{i. } F_u = \frac{3}{2} \times \frac{971 \text{ kg.} \times 70.00 \text{ cm}}{5.04 \text{ m.} \times (5.00 \text{ cm.})^2} = 809.17 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{ii. } I = \frac{1}{12} \times 5.04 \times (5.00)^3 = 52.50 \text{ cm}^4$$

$$E = \frac{241 \text{ kg.} \times (70.00 \text{ cm})^3}{48 \times 0.1377 \text{ cm} \times 52.50 \text{ cm}^4} = 238,219.16 \text{ Kg/cm}^2$$

Promedio

$$F_{u_1} = 785.66 \text{ kg/cm}^2 ; E_1 = 270,977.05 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_{u_2} = 809.17 \text{ kg/cm}^2 ; E_2 = 238,219.16 \text{ Kg/cm}^2$$

$$F_u = 797.42 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 254,598.11 \text{ Kg/cm}^2$$

6.2.2. Compresión paralela a la fibra

La propiedad mecánica a determinar es el esfuerzo de compresión paralelo ultimo, el cual esta dado por la ecuación Ec. 5.8, y se calcula de la siguiente manera:

a. Madera verde

Probeta 1

$$\begin{aligned} \text{Area (A)} &= 25.81 \text{ cm}^2 \\ P &= 7,690.00 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\text{Esfuerzo de compresión paralela} = F_c = \frac{P}{A}$$

$$F_c = \frac{7690 \text{ kg}}{25.81 \text{ cm}^2} = 297.95 \text{ kg/cm}^2$$

Probeta 2

$$\begin{aligned} \text{Area (A)} &= 25.62 \text{ cm}^2 \\ P &= 7,860.00 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$F_c = \frac{7860 \text{ kg}}{25.62 \text{ cm}^2} = 306.79 \text{ kg/cm}^2$$

Promedio

$$F_{c_1} = 297.95 \text{ kg/cm}^2, F_{c_2} = 306.79 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = 302.37 \text{ Kg/cm}^2$$

b. Madera seca al aire

Probeta 1

$$\text{Area (A)} = 25.19 \text{ cm}^2$$

$$P = 11,200.00 \text{ Kg}$$

$$F_c = \frac{11200 \text{ kg}}{25.19 \text{ cm}^2} = 444.62 \text{ kg/cm}^2$$

Probeta 2

$$\text{Area (A)} = 25.92 \text{ cm}^2$$

$$P = 8,500.00 \text{ Kg}$$

$$F_c = \frac{8500 \text{ kg}}{25.92 \text{ cm}^2} = 327.93 \text{ kg/cm}^2$$

Promedio

$$F_{c_1} = 444.62 \text{ kg/cm}^2, F_{c_2} = 327.93 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = 386.27 \text{ Kg/cm}^2$$

c. Madera seca en horno

Probeta 1

$$\text{Area (A)} = 24.65 \text{ cm}^2$$

$$P = 12,000.00 \text{ Kg}$$

$$F_c = \frac{12000 \text{ kg}}{24.65 \text{ cm}^2} = 486.82 \text{ kg/cm}^2$$

Probeta 2

$$\text{Area (A)} = 22.98 \text{ cm}^2$$

$$P = 14,900.00 \text{ Kg}$$

$$F_c = \frac{14900 \text{ kg}}{22.98 \text{ cm}^2} = 648.39 \text{ kg/cm}^2$$

Promedio

$$F_{c_1} = 486.82 \text{ kg/cm}^2, F_{c_2} = 648.39 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = 567.60 \text{ Kg/cm}^2$$

6.2.3. Compresión perpendicular

Se determina el esfuerzo de compresión perpendicular último radial o tangencial utilizando la ecuación Ec. 5.9 de la siguiente manera:

a. Madera verde

Compresión perpendicular radial

$$\text{Área (A)} = 26.74 \text{ cm}^2$$

$$P = 1,620.00 \text{ Kg}$$

$$\text{Esfuerzo de compresión perpendicular radial} = F_{c_R} = \frac{P}{A}$$

$$F_{C_R} = \frac{1620 \text{ kg}}{26.74 \text{ cm}^2} = 60.58 \text{ kg/cm}^2$$

Compresión perpendicular tangencial

$$\text{Área (A)} = 26.51 \text{ cm}^2$$

$$P = 1,623.00 \text{ Kg}$$

$$\text{Esfuerzo de compresión perpendicular tangencial} = F_{C_T} = \frac{P}{A}$$

$$F_{C_T} = \frac{1623 \text{ kg}}{26.51 \text{ cm}^2} = 61.22 \text{ kg/cm}^2$$

b. Madera seca al aire

Compresión perpendicular radial

$$\text{Área (A)} = 25.26 \text{ cm}^2$$

$$P = 2,060.00 \text{ Kg}$$

$$F_{C_R} = \frac{2060 \text{ kg}}{25.26 \text{ cm}^2} = 81.55 \text{ kg/cm}^2$$

Compresión perpendicular tangencial

$$\text{Área (A)} = 25.30 \text{ cm}^2$$

$$P = 2,020.00 \text{ Kg}$$

$$F_{c_T} = \frac{2020 \text{ kg}}{25.30 \text{ cm}^2} = 79.84 \text{ kg/cm}^2$$

c. Madera seca en horno

Compresión perpendicular radial

$$\text{Area (A)} = 24.61 \text{ cm}^2$$

$$P = 2,560.00 \text{ Kg}$$

$$F_{c_R} = \frac{2560 \text{ kg}}{24.61 \text{ cm}^2} = 104.02 \text{ kg/cm}^2$$

Compresión perpendicular tangencial

$$\text{Área (A)} = 24.97 \text{ cm}^2$$

$$P = 3,370.00 \text{ Kg}$$

$$F_{c_T} = \frac{3370 \text{ kg}}{24.97 \text{ cm}^2} = 134.96 \text{ kg/cm}^2$$

6.2.4. Dureza

La carga máxima de penetración, radial o tangencial, se determina promediando los valores de las cargas obtenidas en cada ensayo, según sea el caso. Una manera práctica de cálculo es la utilización de tablas como se indica a continuación.

a. Madera verde

Tabla II. Determinación de cargas máximas de penetración para probetas de madera verde

DIRECCIÓN	PROBETA 1			PROBETA 2			CARGA PROMEDIO (Kg)
	PENETRA-CION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	PENETRA-CION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	
RADIAL	1	340	350.00	1	320	322.50	336.25
	2	360		2	325		
TANGENCIAL	1	310	300.00	1	360	357.50	328.75
	2	290		2	355		

b. Madera seca al aire

Tabla III. Determinación de cargas máximas de penetración para las probetas de madera seca al aire

DIRECCIÓN	PROBETA 1			PROBETA 2			CARGA PROMEDIO (Kg)
	PENETRA-CION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	PENETRA-CION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	
RADIAL	1	280	285.00	1	275	270.00	277.50
	2	290		2	265		
TANGENCIAL	1	255	252.50	1	245	242.50	247.50
	2	250		2	240		

c. Madera seca en horno

Tabla IV. Determinación de cargas máximas de penetración para las probetas de madera secas en horno

DIRECCIÓN	PROBETA 1			PROBETA 2			CARGA PROMEDIO (Kg)
	PENETRACION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	PENETRACION	CARGA (Kg)	CARGA PROMEDIO	
RADIAL	1	475	455.00	1	430	440.00	447.50
	2	435		2	450		
TANGENCIAL	1	475	462.50	1	405	402.50	432.50
	2	450		2	400		

6.3. Cuadro general de resultados

Tabla V. Características físicas

CUADRO GENERAL DE RESULTADOS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS				
ENSAYO	PROPIEDAD DETERMINADA	MADERA VERDE	MADERA SECA AL AIRE LIBRE	MADERA SECA EN HORNO
Humedad	Contenido de humedad (%)	36.98	12.81	7.04
Contracción	Contracción Radial (%)	--	2.35	4.76
	Contracción tangencial (%)	--	2.48	5.58
Peso específico (P.E)	P.E. Verde (g/cm ³)	1.03	--	--
	P.E. Al aire (g/cm ³)	--	0.42	--
	P.E. Al horno (g/cm ³)	--	--	0.63

Tabla VI. Características mecánicas

CUADRO GENERAL DE RESULTADOS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS					
ENSAYO	PROPIEDAD DETERMINADA	MADERA VERDE	MADERA SECA AL AIRE LIBRE	MADERA SECA EN HORNO	
Flexión estática	Esfuerzo ultimo Fu, (Kg/cm ²)	625.94	705.72	797.42	
	Módulo elástico E, (Kg/cm ²)	245,949.59	170,511.45	254,598.11	
Compresión paralela a la fibra	Esfuerzo de compresión paralelo ultimo Fc, (Kg/cm ²)	302.37	386.27	567.60	
Compresión perpendicular a la fibra	Esfuerzo de compresión perpendicular ultimo Fc, (Kg/cm ² ,)	RADIAL	60.58	81.55	104.02
		TANGENCIAL	61.22	79.84	134.96
Dureza	Carga máxima de penetración P, (Kg)	RADIAL	336.25	277.50	447.50
		TANGENCIAL	328.75	247.50	432.50

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Contenido de humedad

Las muestras que conservaron la humedad de corte se pueden considerar como madera verde por tener un contenido de humedad mayor del 30%. Mientras las probetas secadas, al aire y horno, alcanzaron una humedad por debajo del punto de saturación de la fibra, el cual se encuentra en un intervalo del 23% al 30%.¹⁵

Con el proceso de secado en horno se alcanzó un menor porcentaje de contenido de humedad que el secado al aire. Además, se observa que las probetas secadas en horno conservaron en gran medida su color natural y las secas al aire obtuvieron un color amarillento.

Contracción radial y tangencial

En las muestras secadas se registró una contracción mayor en la dirección tangencial que la radial. Además, se registra un mayor porcentaje de contracción en las probetas secadas en horno, excediendo casi el doble de la lograda con el secado al aire.

La alta temperatura del horno significa: mayor contracción y pérdida acelerada de humedad en las probetas, causa propicia para la aparición de grietas superficiales. Estos defectos no son visibles en la madera secada al aire libre pero este proceso es demasiado lento.

Peso específico

Los valores de peso específico obtenidos indican que la madera se puede clasificar como madera liviana ó semi-pesada.¹⁶ El alto peso específico de la madera seca al horno indica una mayor resistencia en comparación con la madera seca al aire libre que tiene un peso específico menor, esto es válido únicamente por estar el contenido de humedad de las piezas abajo del punto de saturación de la fibra. En general, una madera más densa es más resistente que una menos densa.

Flexión estática

La carga soportada por la madera verde es menor que la carga soportada por las probetas secadas al aire libre y en horno. Los resultados señalan también que las probetas secas en horno presentan una mayor resistencia que las secadas al aire libre.

Para llegar a la falla, la madera verde presentó una mayor deformación que los otros tipos de probeta, esta se manifestó gradualmente con un estiramiento aparente de las fibras a tensión y transpiración en las fibras a compresión.

El módulo de elasticidad de la madera seca en horno es mayor que el de la madera seca al aire libre, significando mayor rigidez para la madera seca en horno y mayor flexibilidad para la madera seca en aire.

Por arriba del límite elástico las muestras de madera seca en horno registran una mejor cohesión de fibras, no cediendo fácilmente a la falla e incluso con recuperaciones pausadas luego de esta. Las probetas secas al aire libre presentan una deformación constante hasta llegar al punto de falla donde ocurre un rompimiento de fibras. Sin embargo, la deformación para la carga última en ambas muestras es similar.

Los resultados sustentan lo ocurrido con las fallas manifestadas. En las probetas secadas al aire libre fueron más abruptas que en las de madera seca en horno, las cuales se registraron gradualmente presentando astillamiento. Se puede considerar, entonces, que la madera seca al aire es quebradiza por el rompimiento súbito de sus fibras luego de la deformación.

Compresión paralela a la fibra

Los resultados indican un aumento considerable del esfuerzo de compresión último al disminuir el porcentaje de contenido de humedad. También, el esfuerzo último de compresión de la madera seca en horno excede en un 45 por ciento al esfuerzo de compresión último de la madera secada al aire libre.

Compresión perpendicular a la fibra

Como se esperaba, el esfuerzo de compresión último para esta prueba fue mayor para las muestras sometidas a un proceso de secado. Los resultados señalan una diferencia considerable del esfuerzo de compresión último tangencial sobre el radial en las probetas secadas en horno.

Además, los esfuerzos son similares para las muestras secadas al aire libre, existiendo una mínima diferencia a favor del esfuerzo último radial.

Dureza

La carga máxima de penetración de las probetas secadas en horno es mayor que el de las otras muestras. Para todos los ensayos prevalece el valor de la carga de penetración radial sobre la tangencial.

En las probetas sometidas a proceso de secado las fallas de penetración se presentaron marcadamente, predominando el corte de fibra. Para las probetas de madera verde únicamente existió un hundimiento de la fibra la cual regreso, en parte, a su posición original luego de culminado el ensayo.

Los resultados señalan una mayor resistencia al corte, al desgaste de superficie o al hundimiento de ella por la acción de otro cuerpo, para la madera secada.

CONCLUSIONES

1. La selección del método de secado depende no sólo de las características y propiedades de la madera, sino, también, de la aplicación destinada que se desee, por tal razón, el proceso de secado requiere de la más alta atención y experiencia, conociendo los aspectos que intervienen en los mismos.
2. El método de secado en horno permite controlar los factores climáticos, de temperatura y circulación de aire que son imposibles de regular en el proceso de secado al aire libre, beneficiando en gran manera la resistencia y acabado final de las piezas.
3. La disminución del contenido de humedad de la madera mejora sus características físicas y propiedades mecánicas, si el procedimiento se desarrolla inadecuadamente se producen defectos que afectan estas propiedades.
4. Los resultados experimentales señalan que el proceso de secado en horno es más efectivo que el efectuado al aire libre, mejorando las características físicas y propiedades mecánicas del material. Sin embargo, el proceso de secado al aire libre es el más difundido en el medio.

RECOMENDACIONES

1. Debido a que la madera es un material de uso general, es importante que exista una mayor divulgación de las ventajas obtenidas al someterla a un proceso de secado.
2. Se recomienda la realización de estudios enfocados a implementar el proceso de secado en horno en el medio, ya que, presenta mejores resultados que el proceso de secado al aire libre.
3. La existencia de varias especies de madera en el país hace necesario el conocimiento de las propiedades físicas y características mecánicas de estas, por lo que se recomienda la realización de estudios enfocados a determinar las propiedades y características de la madera tomando como base los lineamientos de secado descritos en el presente trabajo y si los recursos lo permite, utilizar una mayor cantidad de probetas para obtener resultados más representativos.

REFERENCIAS

1. “El secado de la madera”, **documento 02064 CICON USAC**, (6):187.
2. Silverio Viscarra. **Guía para el secado de la madera en hornos**. (Santa Cruz, Bolivia: Editorial El País, 1998) p. IV-4.
3. “El secado de la madera”, **documento 02064 CICON USAC**, (6):179.
4. **Aprendiendo a secar madera al aire libre**. (Honduras: Centro de utilización y promoción de productos forestales CUPROFOR, s.a) p.4
5. Ibid., p. 22
6. Ibid., p. 11
7. Ibid., p. 12
8. Eliel J. Sahlman, **Secamiento artificial de la madera**. (Santiago, Chile: Instituto Forestal de Chile, 1963) p. 7
9. “El secado de la madera”, **documento 02064 CICON USAC**, (6):191.
10. Silverio Viscarra. **Guía para el secado de la madera en hornos**. (Santa Cruz, Bolivia: Editorial El País, 1998) p. 21
11. “Secado de la madera al aire libre”, **Biblioteca atrium de la madera**. 2: 47-53.

12. Robert H Mills, **Procesos de secado para evitar defectos en la madera verde.** (Louisiana: State University Agricultural Center, s.a) pp. 15-17
13. **Base de datos forestales de Guatemala.** (Guatemala: Proyecto de investigación Forestal de INAB, s.a), versión digital
14. Los valores indicados en las tablas son representativos de la gráfica carga-deformación, ya que el software permite obtener un sin fin de valores dependiendo de la escala programada.
15. Exequiel Herrera Acajabon, Propiedades físico-mecánicas de tres especies de madera de peten. (Tesis Usac, 1991) p. 31
16. En la clasificación de madera por peso específico se considera como madera liviana a la contenido entre el rango de 0.4 -0.5, y madera semi pesada a la contenida entre 0.5-0.65 gr/cm³. Fuente: Herrera Acajabon, Exequiel. Propiedades físico-mecánicas de tres especies de madera de Peten. (Tesis Usac, 1991) p. 33

BIBLIOGRAFÍA

1. **Aprendiendo a secar madera al aire libre.** Honduras: Centro de utilización y promoción de productos forestales CUPROFOR, s.a. 29 pp.
2. **Biblioteca atrium de la madera.** (Colección técnica de Bibliotecas Profesionales, volumen 2). Barcelona, España: ediciones Atrium S.A. s.a. 127 pp.
3. **“El secado de la madera”**, documento 02064 (CICON, USAC) (capitulo 6):176. s.a.
4. Godinez Mansilla, William Ramón. Ingeniería de la madera en Guatemala. Tesis Ingeniero Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 92 pp.
5. Herrera Acajabon, Exequiel. Propiedades físico-mecánicas de tres especies de madera de Peten. Tesis Ingeniero Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991. 86 pp.
6. **Maderas: propiedades, clasificación, medición y aplicaciones.** 3ª. Edición (volumen 1). Chile: Corporación chilena de la madera, 1963. 81 pp.

7. Muñoz Acosta, Freddy. **Secado experimental de la madera de melina (Gmelina arborea) proveniente de la zona atlántica de Costa Rica.** (Informe # 26). Costa Rica: s.e., 2004. 25 pp.
8. Pineda del Cid, Luís S. Estudio de las propiedades física-mecánicas de la madera del Pinus Caribaea de Poptún. Tesis Ingeniero Civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1963. 130 pp.
9. **Procesos de secado para evitar defectos en la madera verde.** www.lsuagcenter.com. 3 de agosto de 2005.
10. Sahlman, Eliel J. **Secamiento artificial de la madera.** Santiago, Chile: Instituto Forestal de Chile, 1963. 65 pp.
11. Viscarra, Silverio. **Guía para el secado de la madera en hornos.** (Proyecto de Manejo Forestar Sostenible BOLFOR). Santa Cruz, Bolivia: Editorial El País, 1998. 30 pp.

APÉNDICES

Figura 31. Máquina universal de carga para ensayos de compresión y dureza.



Figura 32. Máquina universal de carga para ensayo de flexión estática.



Figura 33. Ensayo de flexión estática, falla en fibra cruzada y astillosa

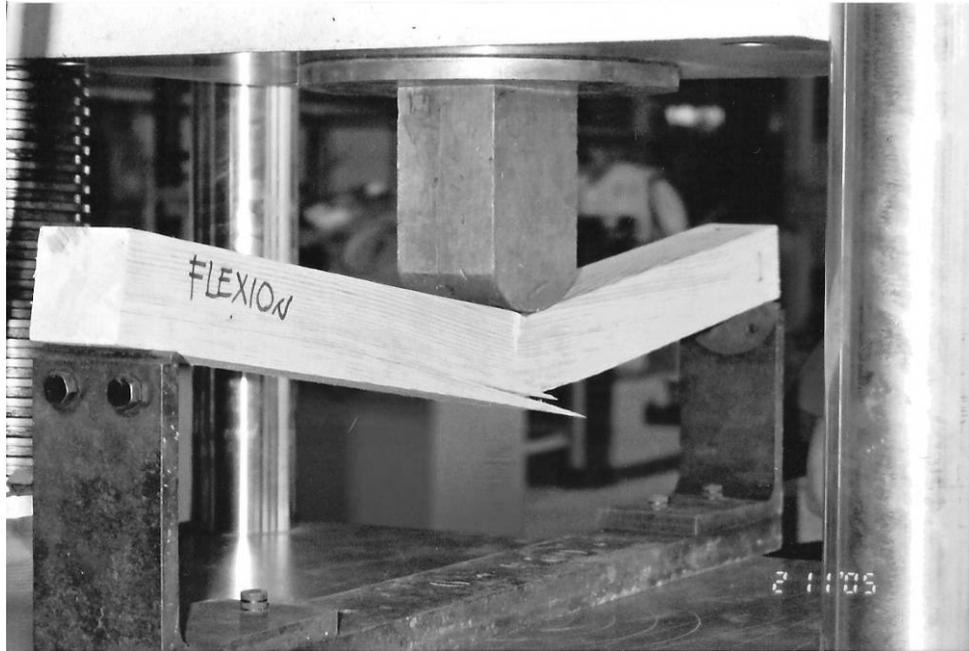


Figura 34. Ensayo de flexión estática, falla en fibra cruzada

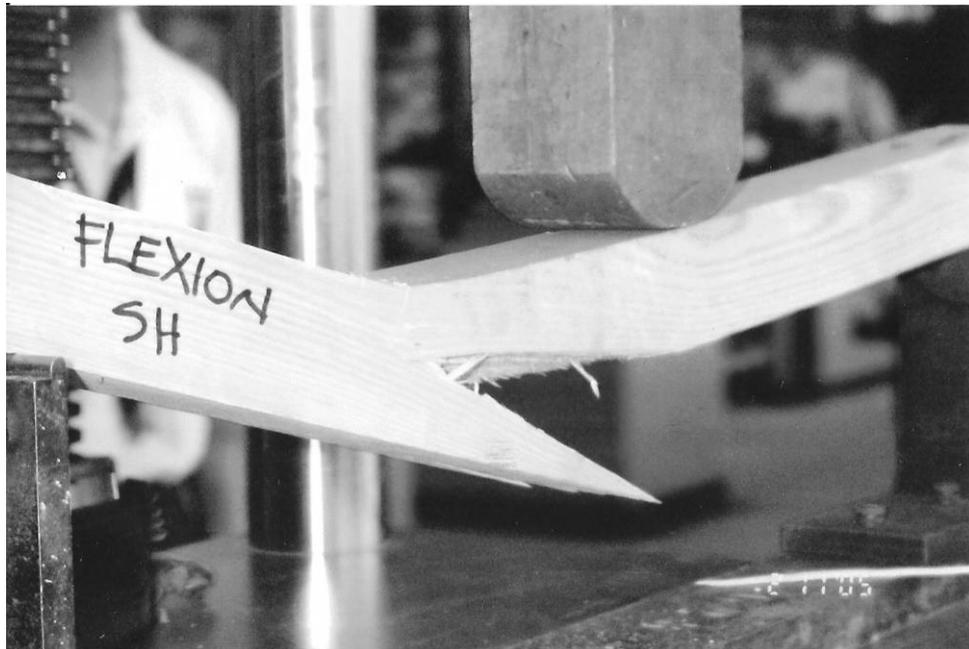


Figura 35. Ensayo de flexión estática, falla a tensión simple

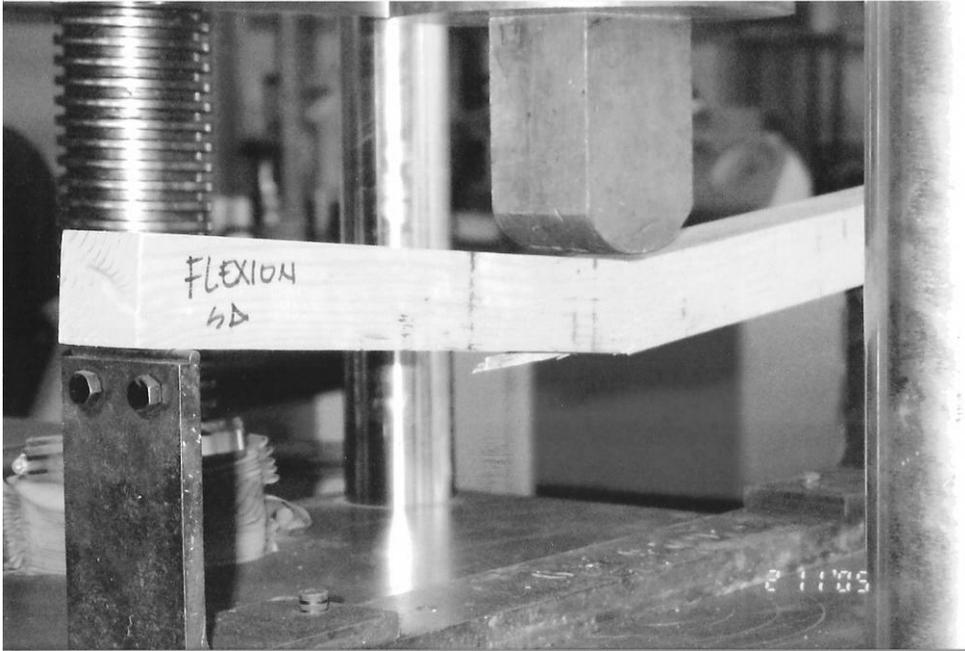


Figura 36. Ensayo de flexión estática, falla a tensión astillosa

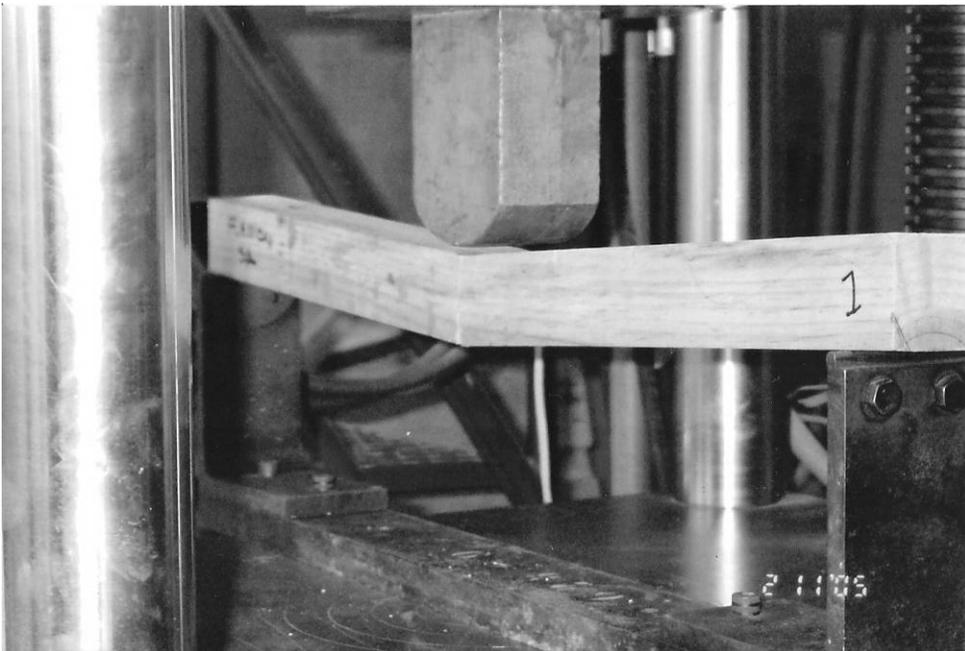


Figura 37. Ensayo de compresión perpendicular a la fibra



Figura 38. Aplicación de carga en ensayo de compresión perpendicular



Figura 39. Ensayo de compresión paralela a la fibra, falla por aplastamiento

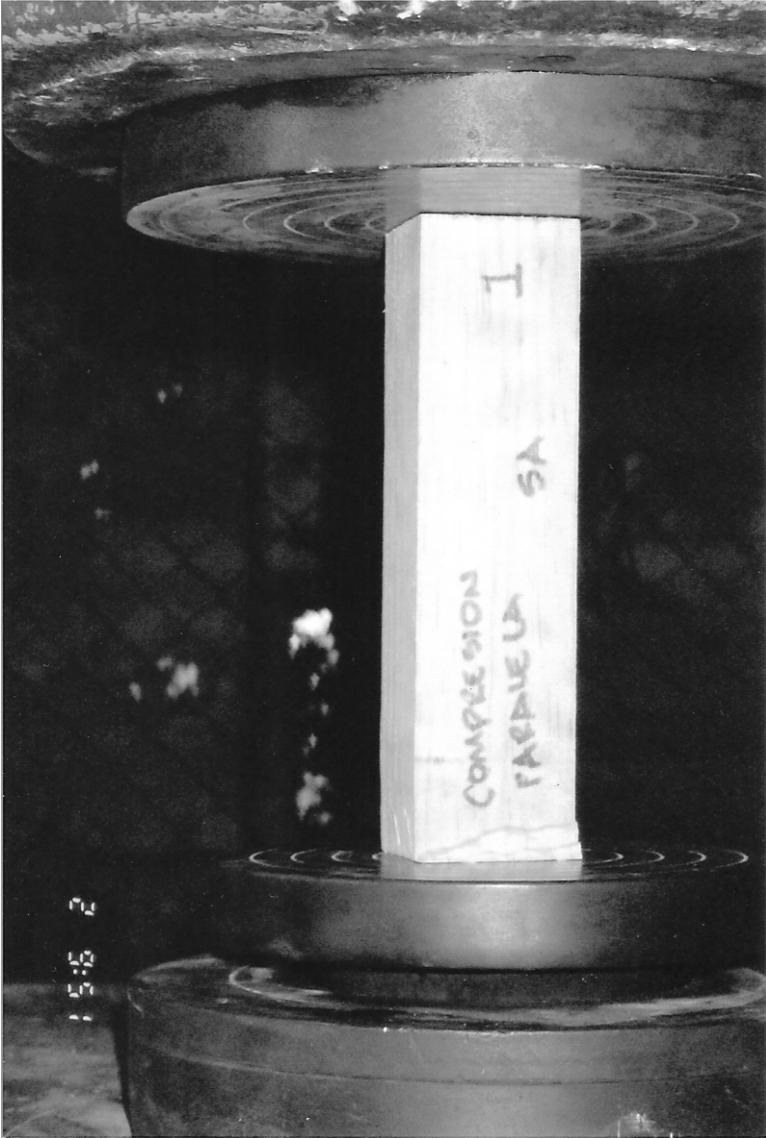


Figura 40. Ensayo de dureza, penetración en el borde de la probeta

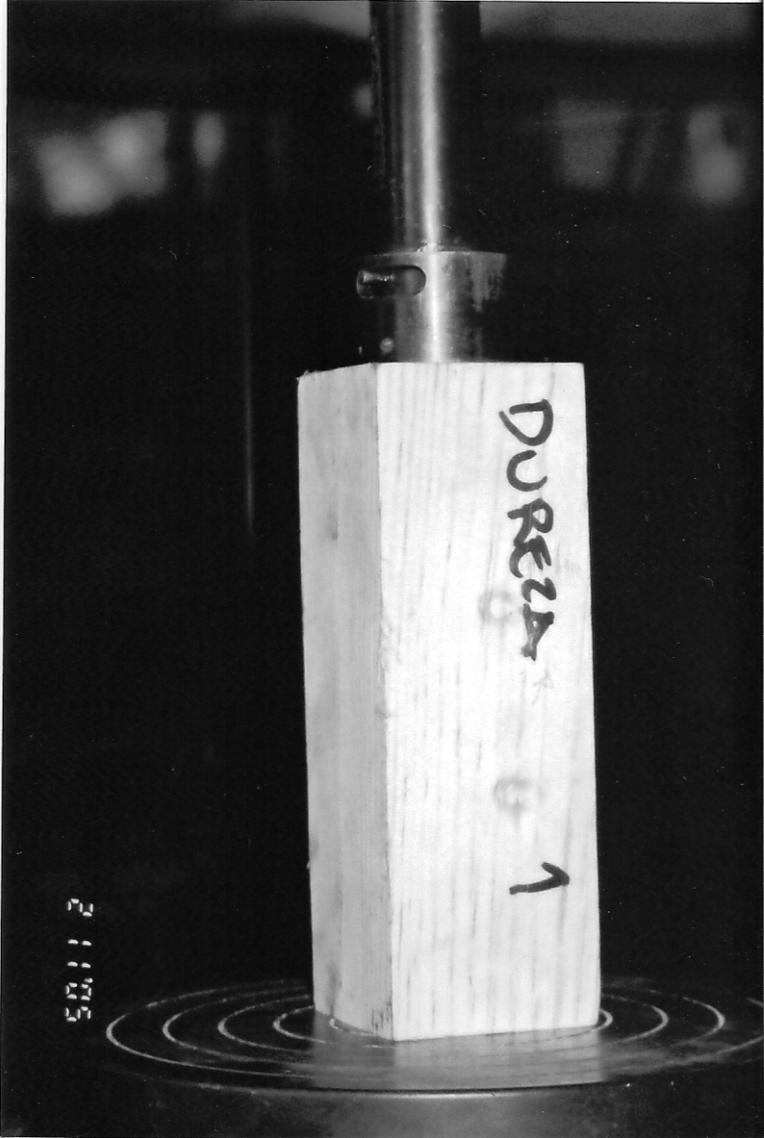
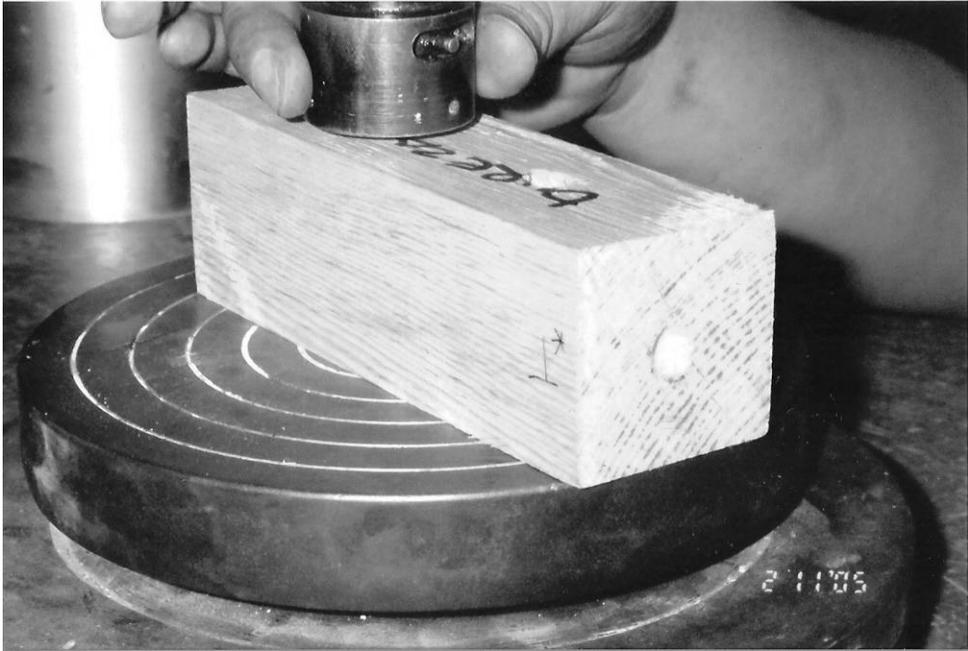


Figura 41. Ensayo de dureza, penetración radial



ANEXOS

Tabla VII. Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera verde

MADERA VERDE			
PROBETA 1		PROBETA 2	
CARGA (Kg)	Deformación (mm)	CARGA (Kg)	Deformación (mm)
203	0.801	240	0.836
250	1.441	300	1.566
301	2.19	351	2.29
351	2.93	400	3.05
400	3.69	451	3.85
451	4.62	500	4.66
500	5.54	550	5.5
550	6.49	600	6.48
600	7.62	650	7.63
650	8.95	700	9.02
700	10.66	750	10.84
752	13.2	800	13.57
800	16.48	812	14.43
820	18.73	820	15.12
840	22	831	16.16
845	23.2	841	17.16
840	23.5	845	17.6
842	24	850	18.6
845	24.4	852	20.8
846	24.5	853	23.1
835	24.5	856	23.4
800	24.8	850	25.9
821	26.3	846	27.1
824	27.2	831	29.2
760	28.8	819	29.3
740	39.1	789	29.3
720	41.2	700	29.6
700	41.8	703	34.4
650	45.4	602	34.5
500	51.5	500	37.7
430	51.7	430	39.8

Figura 42. Gráfica carga-deformación madera verde, probeta 1

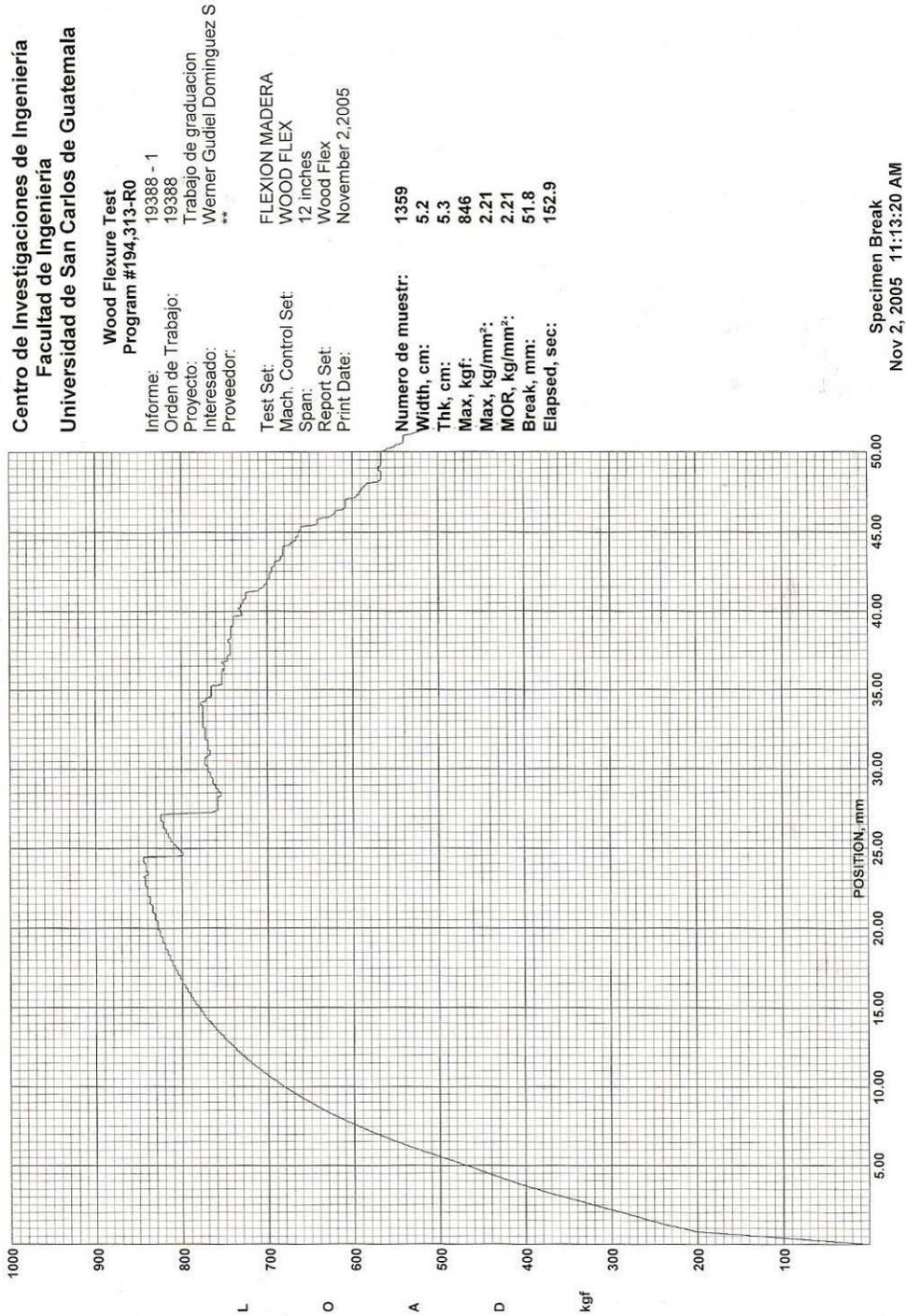


Figura 43. Gráfica carga-deformación madera verde, probeta 2

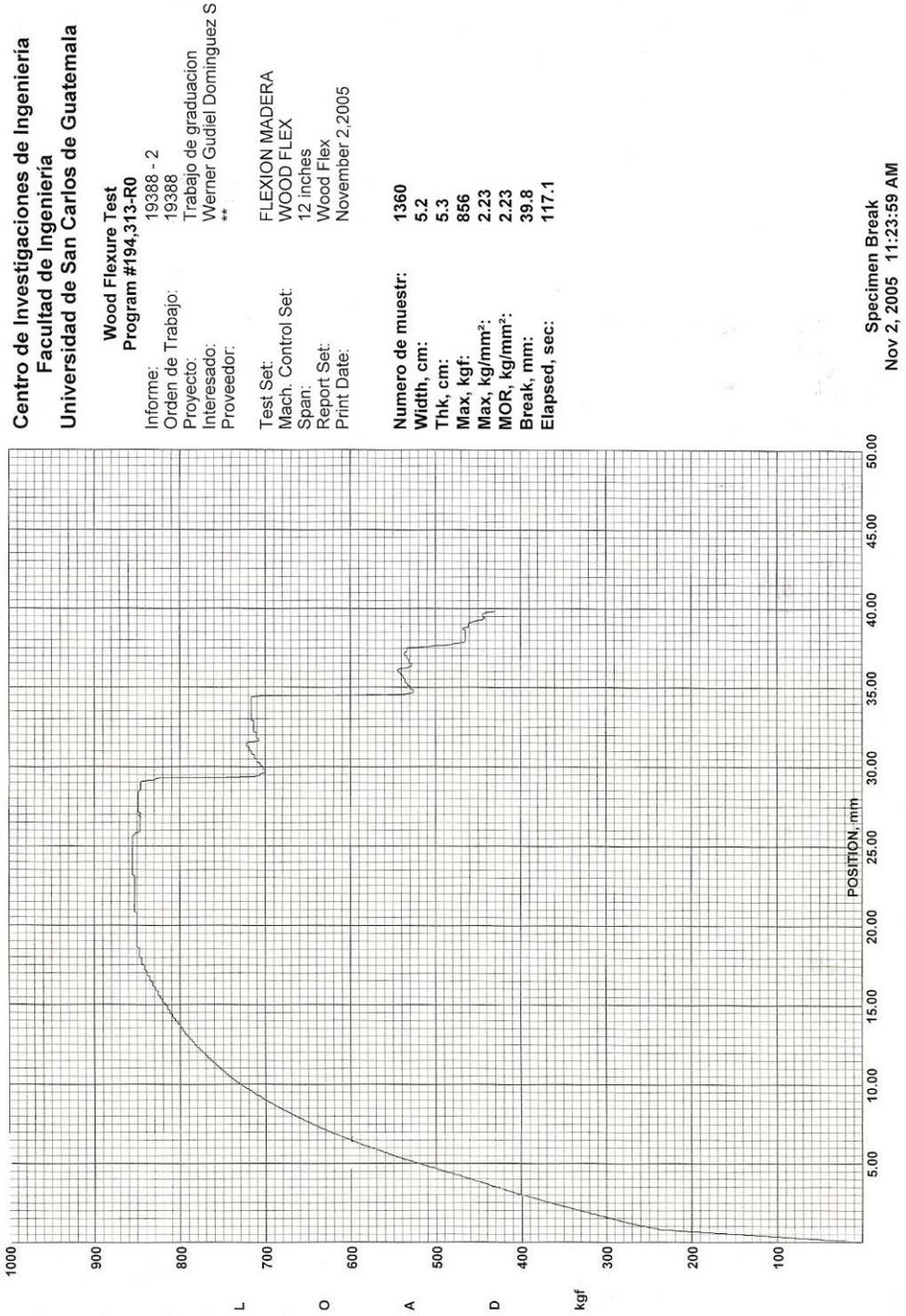


Tabla VIII. Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera secas al aire libre

MADERA SECA AL AIRE LIBRE			
PROBETA 1		PROBETA 2	
CARGA (Kg)	Deformación (mm)	CARGA (Kg)	Deformación (mm)
166.4	0.783	176.3	0.777
201	1.275	249	1.785
250	2.13	300	2.51
302	2.98	351	3.20
350	3.75	400	3.91
400	4.64	451	4.70
451	5.69	502	5.51
502	6.61	550	6.25
551	7.60	601	7.00
600	8.78	650	7.81
652	10.07	699	8.68
653	10.13	750	9.70
700	11.81	801	10.85
750	14.86	850	12.20
760	15.56	875	13.10
771	16.44	901	14.03
780	17.17	940	16.17
790	18.12	951	17.00
800	19.40	955	17.29
803	19.82	956	17.54
806	20.10	958	17.56
800	20.10	948	17.62
625	20.10	904	17.63
		885	17.64
		865	17.67
		900	19.15
		917	23.10
		888	23.10
		664	23.20

Figura 44. Gráfica carga-deformación madera seca al aire libre, probeta 1

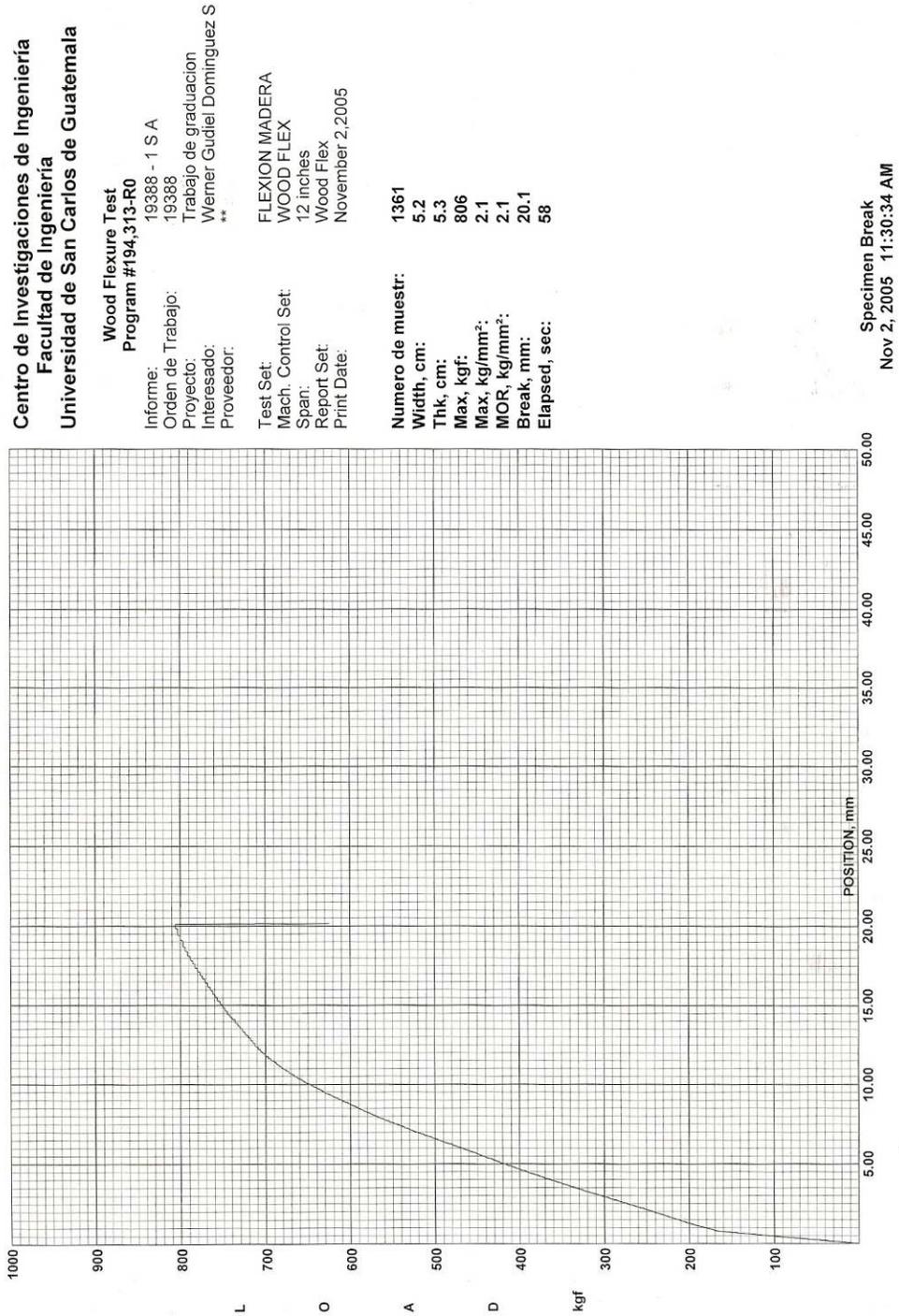


Figura 45. Gráfica carga-deformación madera seca al aire libre, probeta 2

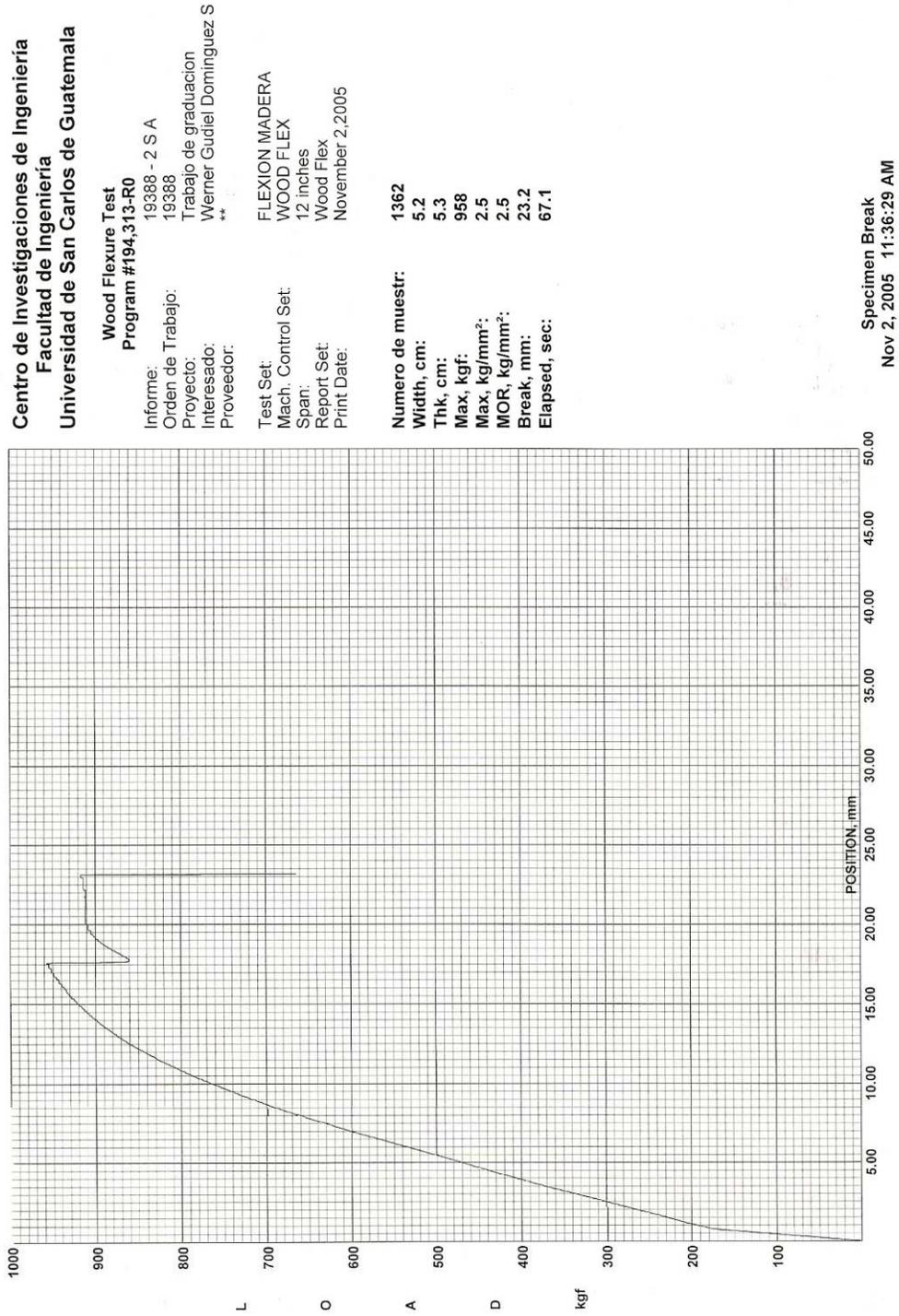


Tabla IX. Valores de carga-deformación, ensayo de flexión estática en probetas de madera secas en horno

MADERA SECA EN HORNO			
PROBETA 1		PROBETA 2	
CARGA (Kg)	Deformación (mm)	CARGA (Kg)	Deformación (mm)
201	0.771	201	0.841
251	1.376	252	1.544
301	2.04	301	2.23
352	2.73	352	2.93
402	3.43	400	3.61
450	4.21	452	4.33
500	4.98	502	5.11
550	5.70	551	5.81
601	6.51	600	6.51
649	7.33	650	7.26
700	8.31	702	8.13
750	9.44	751	9.01
800	10.91	801	10.03
849	12.92	851	11.26
875	14.18	901	12.79
901	16.58	912	13.21
907	18.58	900	14.04
911	19.21	950	16.53
913	19.45	970	18.40
908	19.48	971	18.52
894	19.50	940	18.60
882	19.59	926	19.03
906	21.00	944	20.50
840	26.50	928	20.50
781	26.80	890	24.30
745	30.60	827	24.70
550	31.00	748	25.00
480	31.60	490	33.50

Figura 46. Gráfica carga-deformación madera seca en horno, probeta 1

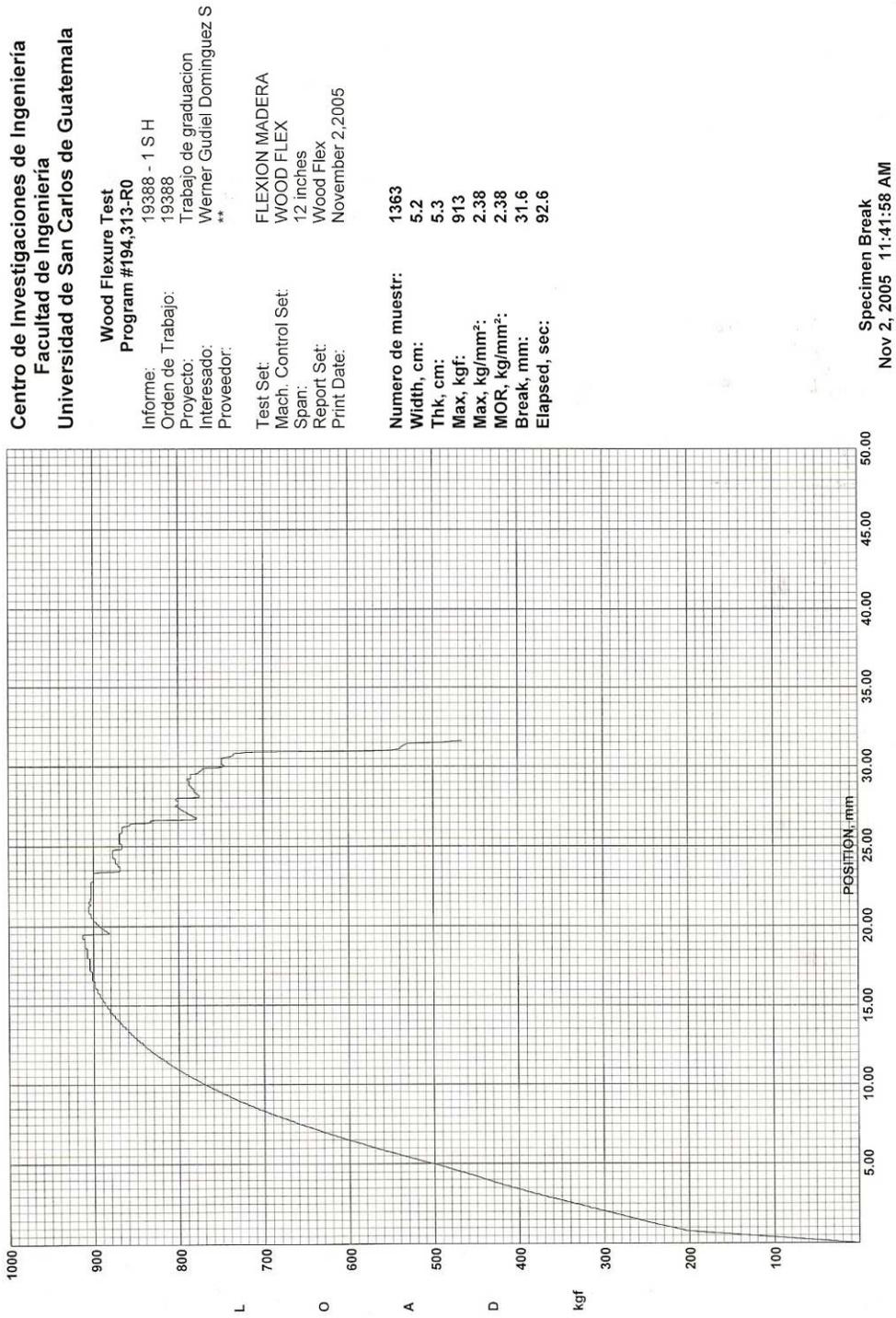


Figura 47. Gráfica carga-deformación madera seca en horno, probeta 2

