



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ciencias en Estructuras

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA
MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA
REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN
VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I**

Ing. Gilberto de Jesús Guerra Flores

Asesorado por: Mtro. José Humberto Rosal Paz

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA
MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA
REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN
VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA POR

ING. GILBERTO DE JESÚS GUERRA FLORES
ASESORADO POR EL MTRO. ING. JOSÉ HUMBERTO ROSAL PAZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

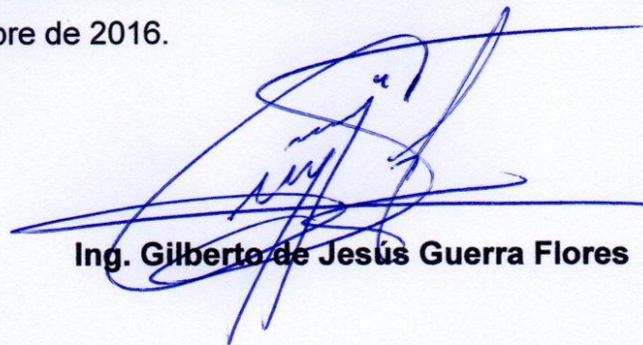
DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR(A)	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR(A)	Mtro. Ing. César Augusto Castillo Morales
EXAMINADOR(A)	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I

Tema que fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 19 de noviembre de 2016.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the printed name.

Ing. Gilberto de Jesús Guerra Flores

Ref.APT-2019-013

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Tesis de la Maestría en Ciencias en Estructuras titulado: **"DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I"** presentado por el Ingeniero Civil Gilberto de Jesús Guerra Flores quien se identifica con Carné 200946235, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/LZLA.

Ref.APT-2019-013

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Tesis titulado "DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I" presentado por el Ingeniero Civil Gilberto de Jesús Guerra Flores quien se identifica con Carné 200946235, correspondiente al programa de Maestría en Ciencias en Estructuras; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/LZ.LA.

Como Coordinadora de la Maestría en Ciencias en Estructuras doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Tesis titulado "DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I" presentado por el Ingeniero Civil Gilberto de Jesús Guerra Flores quien se identifica con Carné 200946235.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



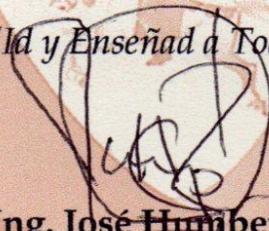
Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Civil **Gilberto de Jesús Guerra Flores** quien se identifica con carné No. **200946235** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Tesis titulado **"DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Ciencias en Estructuras en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



José Humberto Rosal Paz
INGENIERO CIVIL
MSc. INGENIERIA ESTRUCTURAL
COLEGIADO No. 5869

Maestro. Ing. José Humberto Rosal Paz
Asesor(a)

Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/LZLA.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por permitirme superar las adversidades a las que me vi sometido en el proceso, por brindarme la sabiduría para reconocer el camino, la fortaleza para enfrentar mis temores, la voluntad hacer lo que solo yo debía hacer y la salud que me has enseñado a valorar.
- Mis padres** Si todos los guatemaltecos tuvieran la suerte de tener padres como los que yo tengo, no cabe duda que nuestro país sería considerado de “primer mundo”.
- Mis hermanos** Por el soporte moral que representan en mi vida y la colaboración brindada en todo momento.
- Mis catedráticos** Por las enseñanzas transmitidas, compartir su experiencia y la orientación profesional ofrecida. En especial al Ing. Humberto Rosal, por brindarme asesoría de tesis de maestría.
- Mis compañeros** Por proveerme de valiosas enseñanzas para forjarme como ingeniero estructural y la amistad ofrecida desde el primer momento.
- USAC** Especialmente a la Escuela de Estudios de Postgrado, al Centro de Investigaciones de Ingeniería y al Centro Universitario de Oriente.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Todo lo que tengo, lo que tendré, lo que soy y lo que seré, es por ti.
Guatemala	De la misma forma que dedico cada acción de mi vida para engrandecerte.
Mis padres	Ana Miriam Flores Folgar y Leonel Oswaldo Guerra Villafuerte. Como un pequeño tributo a los mejores padres, a quienes jamás seré capaz de pagar lo que me han dado.
Mis hermanos	Leonel Oswaldo, Allan Fernando y Brissa Carmen María, por ser junto con nuestros padres, las personas más importantes de mi vida.
La libertad	A la honradez, a la justicia, a la ciencia, a la verdad, a la objetividad, a la prudencia, a la caridad, a la generosidad, a la humildad, a la humanidad, a la Tierra, al respeto, a la lealtad, a la perseverancia y la paz.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Madera	1
1.2. Pino Oocarpa	1
1.3. Viga tipo I	2
1.4. Esfuerzos internos de los materiales	3
1.4.1. Compresión	4
1.4.2. Tensión	4
1.4.3. Corte	5
1.4.4. Flexión	6
1.5. Propiedades mecánicas de la madera	6
1.6. Parámetros estadísticos	8
2. CLASIFICACIÓN DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA DE LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA	9
2.1. Determinación de la región	9
2.2. Selección de la especie	10

2.3.	Normativa ASTM para ensayos sobre propiedades mecánicas de la madera.....	11
2.3.1.	Determinación del tipo y número de ensayos	11
2.4.	Proceso de clasificación	12
2.4.1.	Asistencia profesional.....	12
2.4.2.	Adquisición de la madera	12
2.4.3.	Clasificación de la especie	14
2.5.	Fabricación de probetas con base a ASTM D 143.....	17
2.5.1.	Taller de carpintería.....	19
2.5.2.	Contenido de humedad	21
2.5.3.	Secado de la madera.....	23
3.	DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO OOCARPA DE LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA	25
3.1.	Realización de ensayos a probetas.....	25
3.1.1.	Ensayo de compresión paralelo a la fibra	26
3.1.2.	Ensayo de tensión paralelo a la fibra	28
3.1.3.	Ensayo de corte perpendicular a la fibra.....	31
3.1.4.	Ensayo de flexión estática	32
3.2.	Procesamiento de datos	35
3.2.1.	Métodos estadísticos	36
3.2.1.1.	Cuadro estadístico	36
3.3.	Presentación de resultados de propiedades mecánicas de la madera	37
4.	ENSAMBLAJE Y ENSAYOS DE VIGAS TIPO I.....	39
4.1.	Funcionamiento de vigas tipo I.....	39
4.1.1.	Esfuerzos de trabajo.....	40

4.1.2.	Aplicaciones.....	41
4.2.	Fundamentos de diseño	42
4.2.1.	Normativa para ensayos.....	42
4.2.2.	Conceptos de diseño	43
4.3.	Ensamble de viga tipo I.....	46
4.3.1.	Pre dimensionamiento	46
4.3.2.	Condiciones de carga	48
4.3.3.	Deformaciones.....	50
4.3.4.	Fabricación de piezas.....	51
4.3.4.1.	Alma.....	52
4.3.4.2.	Patines.....	53
4.3.5.	Proceso de ensamblaje	55
4.4.	Ensayo de vigas tipo I ensambladas	58
4.4.1.	Ensayo a corte vigas tipo I.....	58
4.4.2.	Ensayo a flexión vigas tipo I	61
4.5.	Presentación de resultados	65
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
5.1.	Propiedades mecánicas de madera de pino Oocarpa	67
5.2.	Ensayos sobre vigas tipo I.....	69
	CONCLUSIONES	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÉNDICES	89
	ANEXOS.....	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sección típica, vigas tipo I	3
2.	Esfuerzo de compresión	4
3.	Esfuerzo de tensión	4
4.	Esfuerzo cortante	5
5.	Esfuerzo de flexión	6
6.	Cobertura a bosques en Guatemala	10
7.	Visita al aserradero	13
8.	Trozas de pino Oocarpa	13
9.	Identificación e instrucción sobre el corte de la madera	14
10.	Corte de troza A.....	15
11.	Corte de troza B.....	16
12.	Trozas A y B preparadas para su transporte.....	16
13.	Probeta para ensayo de compresión paralelo a la fibra.....	17
14.	Probeta para ensayo de tensión paralelo a la fibra.....	18
15.	Probeta para ensayo de corte perpendicular a la fibra	18
16.	Probeta para ensayo de flexión estática	19
17.	Taller de carpintería para fabricación de probetas.....	20
18.	Fabricación de probeta para ensayo de tensión	20
19.	Identificación de las probetas	21
20.	Contenido de humedad troza A.....	22
21.	Contenido de humedad de troza B.....	22
22.	Secado de probetas en horno	24
23.	Ensayo de compresión paralelo a la fibra	26

24.	Probeta de compresión A1, falla por corte y rajadura	27
25.	Ensayo de tensión paralelo a la fibra	29
26.	Probeta de tensión B2, falla por ruptura frágil.....	30
27.	Ensayo de corte perpendicular a la fibra.....	31
28.	Probeta de ensayo de corte B2, falla por desgarramiento.....	32
29.	Ensayo de flexión estática.....	33
30.	Probeta de ensayo de flexión estática B1, falla por flexión.....	34
31.	Distribución de esfuerzos por flexión.....	40
32.	Viga sometida a flexión pura	43
33.	Pandeo lateral por flexotorsión.....	46
34.	Pre dimensionamiento de vigas	47
35.	Esquema de ensayo a corte en viga I.....	48
36.	Esquema de ensayo a flexión en viga I.....	49
37.	Almas de vigas tipo I.....	52
38.	Detalle de canto de alma.....	53
39.	Fabricación de patines.....	53
40.	Detalle de patín.....	54
41.	Patines finalizados.....	54
42.	Pegado de alma-patines.....	56
43.	Prensado de vigas	57
44.	Vigas tipo I, finalizadas.....	57
45.	Ensayo a corte en viga tipo I	58
46.	Falla ZJ en viga A ₁	59
47.	Falla WRS en viga B ₁	60
48.	Ensayo a flexión en viga tipo I.....	62
49.	Falla WRS en viga A ₂	63
50.	Falla de viga B ₂	63
51.	Esquema de alabeo seccional.....	72
52.	Alabeo seccional en viga A ₁	73

53.	Alabeo seccional en viga A_2	73
54.	Deformación a flexión viga B_1	74
55.	Fractura en apoyo de viga B_2	75
56.	Falla paralela a la unión alma patín de viga B_1	80
57.	Falla paralela a la unión alma patín de viga A_2	80

TABLAS

I.	Peso de probetas húmedas, en gramos.....	23
II.	Peso de probetas secas, en gramos	24
III.	Cuadro estadístico esfuerzo a compresión	36
IV.	Propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula	37
V.	Resultados de ensayos a corte en vigas I.....	65
VI.	Resultados de ensayos a flexión en vigas I	65
VII.	Consideración de propiedades mecánicas del pino Oocarpa bajo estudio	67
VIII.	Cargas y esfuerzos últimos en vigas tipo I.....	69
IX.	Cargas teóricas de falla por flexión y corte para los esfuerzos normales	71
X.	Módulo de alabeo de vigas I.....	75
XI.	Cargas admisibles, según la longitud de la viga	78
XII.	Resultados ensayo a compresión paralelo a la fibra.....	90
XIII.	Resultados ensayo a tensión paralelo a la fibra.....	90
XIV.	Resultados ensayo a corte perpendicular a la fibra	91
XV.	Resultados ensayo a flexión estática	91
XVI.	Deformaciones en ensayo a flexión estática	92

XVII.	Módulo de elasticidad con base a deformaciones de tabla XVI	92
XVIII.	Proceso estadístico compresión paralelo a la fibra.....	93
XIX.	Proceso estadístico tensión paralelo a la fibra.....	93
XX.	Proceso estadístico corte perpendicular a la fibra	94
XXI.	Proceso estadístico flexión estática	94
XXII.	Proceso estadístico módulo de elasticidad	94
XXIII.	Geometría, vigas tipo I.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de sección transversal
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i> (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)
b	Base
CA-10	Carretera Centro Americana No. 10
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería
cm	Centímetros
cm²	Centímetros al cuadrado
cm³	Centímetros al cubo
cm⁴	Centímetros a la cuarta
Cv	Coefficiente de variación
E	Módulo de elasticidad del material
Fb	Esfuerzo máximo a flexión
FB	Falla por aplastamiento del patín inferior en uno de los apoyos según clasificación ASTM D 5055
h	Altura
I	Momento de inercia
INAB	Instituto Nacional de Bosques
Kg	Kilogramos
m	Metros
M	Momento
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
OSB	Tableros de fibras orientadas (Oriented Strand Board)
P	Carga aplicada

Pu	Carga última
s	Variación estándar
S	Módulo de resistencia de la sección
y_c	Altura del eje neutro respecto a la base
WRS	Falla por corte en el alma a lo largo de la unión superior alma-patín, según clasificación ASTM D 5055
ZW	Falla por corte en las uniones alma-patín superior e inferior y corte del alma en un ángulo cercano a los 45° según clasificación ASTM D 5055
σ	Letra griega sigma. Utilizada para indicar esfuerzos normales
σ_c	Esfuerzo de compresión
σ_M	Tensiones máximas provocadas por flexión
σ_T	Tensiones máximas provocadas por corte
ε	Letra griega épsilon. Utilizada para indicar deformación unitaria
μ	Letra griega Mi. Utilizada para indicar media aritmética
τ	Letra griega Tau. Utilizada para indicar esfuerzos de corte
Σ	Letra griega sigma mayúscula. Utilizada para indicar sumatoria
”	Pulgadas
°	Grados sexagesimales

GLOSARIO

Alabeo seccional	Función que predice la deformación transversal de la sección de un elemento mecánico.
Compresión	Esfuerzo que tiende a aplastar el material del miembro de carga y a acortarlo.
Corte	Llamado también cizallamiento, es la acción de dos fuerzas contrarias que actúan sobre el material intentando desgarrarlo.
Ductilidad	Propiedad de los materiales a deformarse plásticamente sin llegar a la ruptura.
Ensayo mecánico	Prueba donde se determina la resistencia de un material sometido a distintos esfuerzos.
Esbeltez	Característica de los prismas mecánicos que relacionan la rigidez de su sección transversal con su longitud.

Esfuerzo	Magnitud física medida en unidades de fuerza sobre área, utilizada para diseño de elementos estructurales.
Estadística descriptiva	Herramienta matemática que obtiene y describe un conjunto de datos de forma ordenada para facilitar su interpretación.
Flexión	Movimiento causado por una o más fuerzas externas que tiende a flexionar un elemento estructural.
Fragilidad	Propiedad de los materiales a fracturarse con escasa o nula deformación.
Hendibilidad	Propiedad de la madera y metales a romperse y aumentar su altura, debido a ello.
Lignina	Sustancia natural que envuelve las paredes celulares de la madera, dándoles adherencia, dureza y resistencia.
Límite elástico	Esfuerzo máximo que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

Madera	Conjunto de xilemas tubulares de longitud y forma variable, cementados por lignina, proveniente de los vegetales leñosos.
Material heterogéneo	Material no uniforme que posee diferentes propiedades, según la parte que sea analizada.
Material homogéneo	Material uniforme que posee las mismas cualidades o similares en cualquier parte analizada del mismo.
Material ortotrópico	Material que posee diferentes propiedades mecánicas, según el sentido ortogonal que sea analizado.
Media aritmética	Valor medio de un conjunto de datos.
Módulo de elasticidad	Parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico.
Ortogonal	Relativo a lo que forma un ángulo recto.
Perfiles tipo I	También llamado doble T, consta de una sección transversal compuesta por dos alas y un alma que le brindan la forma que a su vez da origen a su nombre.

Pino Oocarpa	Árbol del género <i>pinus</i> de gran plasticidad ecológica de 12 a 18 m de altura que posee una alta producción de madera.
Plywood	Tablero elaborado de diferentes capas de madera pegadas una sobre la otra, también llamado contrachapado.
Propiedades mecánicas	Propiedades de los sólidos que se muestran cuando es aplicada una carga externa.
Tensión	Esfuerzo que tiende a alargar el miembro de carga y a separar el material.
Viscoelasticidad	Comportamiento de ciertos materiales que, al sufrir deformaciones, muestran propiedades viscosas y elásticas a la vez.
Xilema	Tejido vegetal formado por células rígidas y muertas, unidas por lignina, que forman la estructura interna de la madera.
Xilohigrómetro	Aparato utilizado para medir el contenido de humedad de la madera.

RESUMEN

Del estudio de elementos ensamblados en madera para uso de diversas funciones, se encontró un vacío en Guatemala en el campo investigativo acerca de los elementos tipo perfiles, hallándose únicamente documentación extranjera acerca del tema. De igual forma, de la experiencia constructiva en el departamento de Chiquimula, se identificó la necesidad del estudio de la madera usada en construcción, la cual en su mayoría es proveniente del pino Oocarpa. Tales fundamentos constituyeron el punto de partida de la presente investigación.

Inicialmente, se identificó y clasificó, con la ayuda del Centro Universitario de Oriente -Cunori-, la madera del pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula. De tal especie, fueron fabricadas probetas para realizar ensayos de laboratorio de compresión paralela a la fibra, tensión paralela a la fibra, corte perpendicular a la fibra y flexión estática, con el objeto de conocer las propiedades mecánicas del material bajo estudio. Los mencionados ensayos fueron realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-, con base a la norma ASTM D 143.

Posteriormente, y a raíz de los resultados obtenidos durante los ensayos acerca de las propiedades mecánicas, se fabricaron 4 vigas tipo I de la madera de pino Oocarpa. Las mismas fueron ensayadas bajo dos sollicitaciones de carga diferentes en el laboratorio previamente citado, la primera de ellas con una carga puntal al medio de la luz libre entre apoyos, y la segunda con dos cargas puntuales separadas a un tercio de la luz libre, con el objeto de generar las condiciones más severas a corte y flexión, respectivamente, de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM D 5055.

Luego de ello, se realizó análisis y discusión de los resultados obtenidos, de los ensayos de las propiedades mecánicas de la madera y las pruebas en las vigas tipo I, indagando en los efectos generados por las condiciones de carga a las que fueron sometidas, y comparando los resultados generados experimentalmente con la teoría del diseño.

En el proceso fue posible comprobar los esfuerzos que constituyen los estados límites de falla en vigas ensambladas en madera tipo I, se estableció la viabilidad estructural para el uso del componente en actividades constructivas y se generó un precedente en el estudio tecnológico de los mismos en el país.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de investigación del comportamiento estructural de perfiles ensamblados construidos con madera, limita su participación en los procesos constructivos.

Actualmente, la madera tiene una escasa participación en la construcción en Guatemala, siendo utilizada en la mayoría de los casos exclusivamente como formaleta y/o andamios. La misma ha sido relegada de funciones estructurales importantes, debido principalmente al desarrollo que han tenido otros materiales (acero y concreto) y el poco interés mostrado por los investigadores y diseñadores locales en este componente, y en sus propiedades físicas y mecánicas. Sin embargo, en países como Canadá o Estados Unidos, la madera ha ganado su uso en construcción en las últimas décadas, resultado del estudio e investigación, y posterior implementación de perfiles ensamblados como el tipo I, siendo un material con convenientes cualidades mecánicas, renovable y sin requerir un proceso industrial complejo para su fabricación.

La madera producida en la región suroeste de Chiquimula, pino Ocarpa en su mayoría, nunca ha sido sometida a investigación alguna acerca de sus cualidades estructurales y ha sido utilizada únicamente de forma empírica para diversos usos constructivos. Es hasta el año 2018, cuando esta investigación realiza los primeros ensayos sobre las propiedades mecánicas del material, además del estudio como componente estructural para su uso en la construcción de viviendas y/o industria.

Dado lo anteriormente expuesto, surge la interrogante principal:

- ¿Pueden las vigas tipo I de madera ser consideradas viables en los procesos constructivos de edificaciones de mediana y gran envergadura en Guatemala?

De ésta, a su vez, se derivan las interrogantes auxiliares:

- ¿Cuán necesario es conocer las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula?
- ¿Cuáles son los requerimientos necesarios para el diseño de vigas tipo I en madera?
- ¿Qué tan viable es estructuralmente la utilización vigas tipo I de la madera propuesta?

OBJETIVOS

General

Determinar las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, para comprobar su funcionalidad estructural como vigas tipo I ensambladas.

Específicos

- Clasificar la madera de pino Oocarpa de la región suroeste del departamento de Chiquimula, con ayuda del Centro Universitario de Oriente -Cunori-.
- Estudiar mediante ensayos de laboratorio, las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula.
- Proponer el diseño de vigas tipo I ensambladas de madera, de acuerdo a las condiciones obtenidas en los ensayos mecánicos.
- Establecer mediante ensayos estructurales, la viabilidad del uso de la madera como vigas tipo I ensambladas.
- Crear un precedente en el campo de la investigación acerca de las vigas tipo I ensambladas en madera, que sirva como fundamento teórico y práctico para futuras investigaciones.

HIPÓTESIS

La utilización de madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, en el diseño y fabricación para uso como vigas tipo I ensambladas con una sección esbelta, es viable desde el punto de vista estructural para elementos de hasta 6.00 metros de longitud, soportando cargas distribuidas de hasta 200.00 kg/m.

INTRODUCCIÓN

La ocupación de la madera en procesos constructivos es tan antigua como la construcción misma, junto con la piedra han sido los materiales utilizados por excelencia desde los inicios de la humanidad, siendo usada aún en algunos países, por su ventaja en diversos elementos estructurales. Sin embargo, en Guatemala ha dejado de ser utilizada en los últimos años, ante el surgimiento de materiales más modernos y resistentes. Su utilización ha sido delegada como combustible natural o en ebanistería, limitándose su aplicación constructiva en la mayoría de los casos, para sostener o dar forma a otros materiales.

La construcción es una actividad cada vez más compleja y los materiales juegan una parte importante en ello. Por lo tanto, se exige que estos tengan características específicas para soportar determinados esfuerzos y deformaciones. Es en este proceso, donde la madera fue relegada a un plano secundario, pues existe escases de estudios sobre su comportamiento estructural, aun cuando presenta una buena resistencia a los esfuerzos de tensión, compresión y flexión, puede trabajar de forma solitaria y no necesariamente en conjunto, tiene la ventaja de ser un material renovable y no requiere un proceso de fabricación sumamente complicado.

Una de las funciones poco explotadas de la madera en el país, es precisamente como perfiles ensamblados tipo I, debido a la geometría de su sección, poseen convenientes características estructurales y permiten ampliar los límites tradicionales del uso del material. Es por ello que esta investigación presenta el diseño y ensayo de estos componentes, donde fueron determinadas previamente las propiedades mecánicas de la madera utilizada para el estudio. Con esto se busca establecer la capacidad bajo condiciones de carga

preestablecidas, de perfiles esbeltos sin soportes laterales, y crear un precedente en el estudio tecnológico de la madera para usos estructurales en Guatemala.

Por lo anterior, en el capítulo 1, se brinda una revisión de conceptos y definiciones teóricas acerca de la madera y su comportamiento en uso estructural.

En el capítulo 2, se describe el proceso de la clasificación de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula.

Clasificada la madera y obtenidas las probetas necesarias, fueron determinadas las propiedades mecánicas a compresión, tracción, corte y flexión del componente, por medio de ensayos de laboratorio en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Tal proceso, así como sus resultados, se describen en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se procede al diseño, ensamblaje y la realización de ensayos a corte y flexión de vigas ensambladas tipo I de madera de pino Oocarpa, utilizando los resultados del capítulo 3.

En el último capítulo, se analizan y discuten los resultados de la investigación, enfocándose especialmente en aspectos estructurales, estableciendo la viabilidad práctica existente para la ocupación del material.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Madera

“Conjunto de tejidos de xilema que forman el tronco, raíces y ramas de los vegetales leñosos. Desde un punto de vista práctico y económico solo se aprovecha la madera del tronco y de las ramas” (Castillo, 2004, pág. 1).

“La madera está constituida por una aglomeración de células tubulares de forma y longitud muy variables. Si se hace un corte transversal se aprecian diversas zonas; en el centro, la médula y radios medulares que parten de ella hacia la periferia es la parte más vieja” (Godínez, 1996, pág. 1).

Messer (2007) cita a Ananías (1993) quien escribió “la madera es un material sólido, poroso, heterogéneo y de estructura celular conformado por unidades estructurales básicas denominadas células vegetales.” (pág. 23)

1.2. Pino Oocarpa

“El Pinus Oocarpa, Schiede, es una especie de gran plasticidad ecológica debido a que se adapta a gran variedad de tipos de suelos, climas y rangos altitudinales” (Estrada, 1997, pág. 5).

Ortiz (2008) describe la madera y utilización principal de esta especie como sigue:

“La madera del árbol de pino Oocarpa es de color blanco-amarillento en los jóvenes, tornándose más tarde en color rojiza debido a la gran acumulación

de resina. Debido a su alto contenido de trementina se le ha explotado en enormes cantidades. Su utilización se ha centrado en la construcción” (pág. 28).

En cuanto a las características de los árboles de pino Oocarpa, Olvera (1985) afirma lo siguiente:

Árboles de 12 a 18m de altura, pocas veces de 25m; DAP (diámetro) de 40 a 75cm; copas redondeadas, frecuentemente compactas; cortezas agrietadas, oscuras o grisáceas, con placas delgadas, largas, casi regulares; ramas fuertes y extendidas; ramillas morenas, ásperas al principio y después escamosas; hojas en grupos de 5, con una longitud de 17 a 30cm aglomeradas, anchamente triangulares, de color verde claro, tiesas y ásperas, con vainas de 20 a 30cm de largo, color castaño oscuro, persistentes y con escamas acuminadas. (pág. 38)

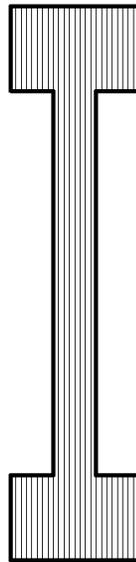
En cuanto a su ocupación, “este tipo de madera es destinada para aserrío, triplay, chapa, celulosa, papel, cajas de empaque, construcciones, duelas y en ebanistería; sin embargo, la mala conformación del fuste, en la mayoría de los casos, le resta demanda en las industrias de aserrío y chapa para triplay” (Olvera, 1985, pág. 41).

1.3. Viga tipo I

También llamadas vigas doble T, consta de una sección transversal compuesta por dos alas y un alma. Se utilizan generalmente para resistir esfuerzos de flexión, trabajando la parte superior a compresión y la inferior a tracción.

Estas son fabricadas generalmente de acero o de madera. En el caso del componente natural son utilizadas con frecuencia para sostener estructuras de obra falsa (andamios) en construcciones de gran envergadura.

Figura 1. **Sección típica, vigas tipo I**



Fuente: elaboración propia.

1.4. Esfuerzos internos de los materiales

“Esfuerzo es la resistencia interna ofrecida por una unidad de área del material del cual está hecho un miembro a una carga externamente aplicada” (Mott, 2009, pág. 19).

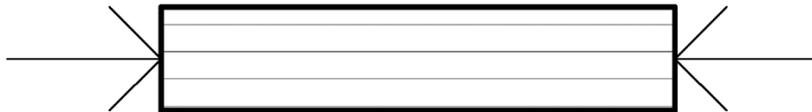
Así mismo, el esfuerzo directo se refiere a casos en los que la fuerza total aplicada es compartida por igual por todas las partes de la sección transversal del miembro que soporta la carga. El esfuerzo directo puede ser provocado por cargas axiales directas, fuerzas cortantes directas o cargas de apoyo o sustentación. (Mott, 2009)

1.4.1. Compresión

“Un esfuerzo de compresión es uno que tiende a aplastar el material del miembro de carga y a acortarlo” (Mott, 2009, pág. 20).

“La madera sometida a una presión local se comprime, el grado depende de la dureza y de la dirección de la fibra cuando se aplica la presión. El aplastamiento será mayor en el sentido perpendicular a las fibras (5 a 8 veces mayor) y menor en el sentido paralelo o de testa” (Viña, 1996/1997, pág. 5).

Figura 2. **Esfuerzo de compresión**



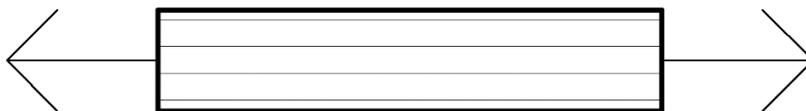
Fuente: elaboración propia.

1.4.2. Tensión

“Un esfuerzo de tensión es uno que tiende a alargar el miembro y a separar el material” (Mott, 2009, pág. 20).

“Se provoca a través de dos fuerzas opuestas que tiran de la madera. La prueba se realiza en el sentido de la fibra y transversalmente, en cuyo caso la resistencia es menor” (Viña, 1996/1997, pág. 52).

Figura 3. **Esfuerzo de tensión**



Fuente: elaboración propia.

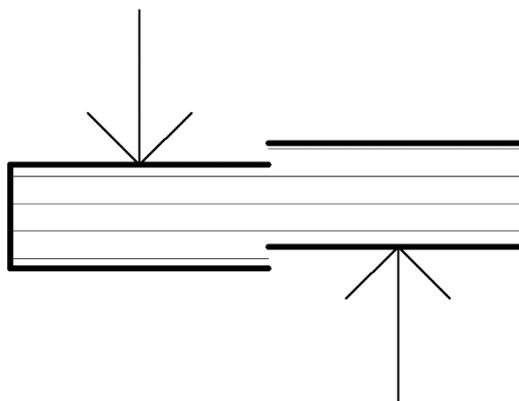
Los esfuerzos de tensión y compresión también son conocidos como esfuerzos normales, donde el esfuerzo actúa perpendicular o normal a la sección transversal del miembro de carga. Generalmente estos son indicados por la letra griega σ (sigma). Si el esfuerzo también es uniforme a través del área resistente, el esfuerzo suele ser llama esfuerzo normal directo. (Mott, 2009)

1.4.3. Corte

“Oposición a la acción de dos fuerzas contrarias que actúan sobre la madera intentando desgarrarla en el sentido paralelo a las fibras” (Viña, 1996/1997, pág. 53).

El esfuerzo cortante se refiere a una acción de corte. Y por supuesto, el objetivo de la acción es cortar en realidad el material. Esto es, desea que el material falle. El símbolo utilizado comúnmente para el esfuerzo cortante es la letra griega minúscula τ (tau). (Mott, 2009)

Figura 4. **Esfuerzo cortante**



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo cortante (o de cizallamiento), a diferencia del normal (tensión o compresión), es producido por fuerzas que actúan paralelamente al plano que las

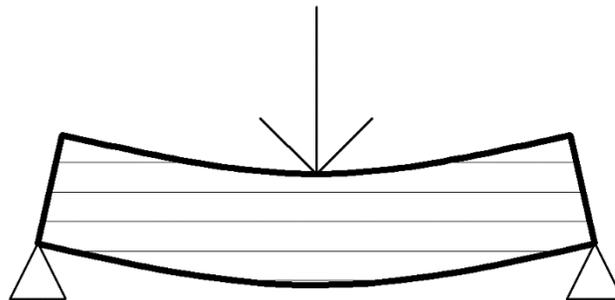
resiste. Es por ello que el esfuerzo cortante puede denominarse esfuerzo tangencial. (Pytel y Singer, 2008)

1.4.4. Flexión

Se refiere a una acción externa que tiende a curvar o flexionar un cuerpo. Si bien puede ser generado por una carga puntual o distribuida, mecánicamente representa un momento, el cual es conocido como momento flexionante. Este puede ser de signo positivo o negativo dependiendo de concavidad que tiende a generar en la viga. (Pytel y Singer, 2008)

“Se denomina así al esfuerzo que realiza una pieza de madera colocada sobre dos apoyos y que recibe un peso en el centro. Otra prueba similar consiste en sujetar la pieza por uno de sus extremos y situar el peso o la fuerza aplicada en el extremo contrario” (Viña, 1996/1997, pág. 53).

Figura 5. **Esfuerzo de flexión**



Fuente: elaboración propia.

1.5. Propiedades mecánicas de la madera

Messer (2007) citando a Fritz (2004), indica que “las propiedades mecánicas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas

o solicitaciones externas. Se entiende por fuerza externa, a cualquier solicitación que, actuando exteriormente, altere su tamaño, dimensión o la deforme.” (pág. 57)

“Se definen como aquellas que miden la aptitud y habilidad de la madera para resistir fuerzas externas. Estas propiedades son prioritarias cuando la madera se destina a la construcción civil y no dejan de tener importancia en muchos otros casos...” (Castillo, 2004, pág. 26).

“La resistencia mecánica de la madera la madera sometida a cargas tiene un comportamiento denominado visco-elástico. Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga” (Martínez & Vignote, 2005, pág. 23).

Por su parte Mott (2009) considera lo siguiente:

Como la madera es un producto natural, su estructura depende de la forma en que crece y no de la manipulación por parte de los seres humanos, como en el caso de los metales. La forma larga, esbelta, cilíndrica de los árboles crea una estructura interna compuesta de celdas longitudinales. Conforme crece el árbol, se agregan anillos por afuera de la madera más vieja. De este modo, el núcleo llamado corazón de la madera tiene propiedades diferentes que la madera alburente o tierna, cerca de la superficie externa.

La especie de la madera también afecta sus propiedades, ya que las diferentes clases de árboles producen madera más dura o más blanda, más fuerte o más débil. Incluso en la misma especie se presenta la variabilidad a causa de diferentes condiciones de crecimiento, tales como diferencias en el suelo y la cantidad de sol y lluvia.

La estructura celular de la madera da lugar al grano que es tan evidente cuando se sierra en forma de tablas y maderos. La resistencia de la madera depende de si carga perpendicular o paralelamente al grano. Además, siguiendo el grano, la resistencia es diferente en una dirección radial que en una dirección tangencial con respecto al tronco del árbol cilíndrico original del cual se cortó.

Otra variable importante que afecta la resistencia de la madera es el contenido de humedad. Los cambios en la humedad relativa, puede variar la cantidad de agua absorbida por las celdas de la madera. (pág. 82)

1.6. Parámetros estadísticos

Media aritmética (μ): representa el valor medio de los datos obtenidos, siendo la representación unitaria de los mismos. Fue utilizado para caracterizar el valor de cada uno de los esfuerzos y el módulo de elasticidad del material.

Variación estándar (s): también conocida como desviación típica, representa la variación de los datos respecto a la media aritmética, permitiendo una interpretación más certera de los valores analizados.

Coeficiente de variación (Cv): indica porcentualmente el grado de variabilidad de los resultados. Matemáticamente se representa como la relación entre la variación estándar y la media aritmética, siendo directamente proporcional a la variabilidad de los datos.

2. CLASIFICACIÓN DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA DE LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA

2.1. Determinación de la región

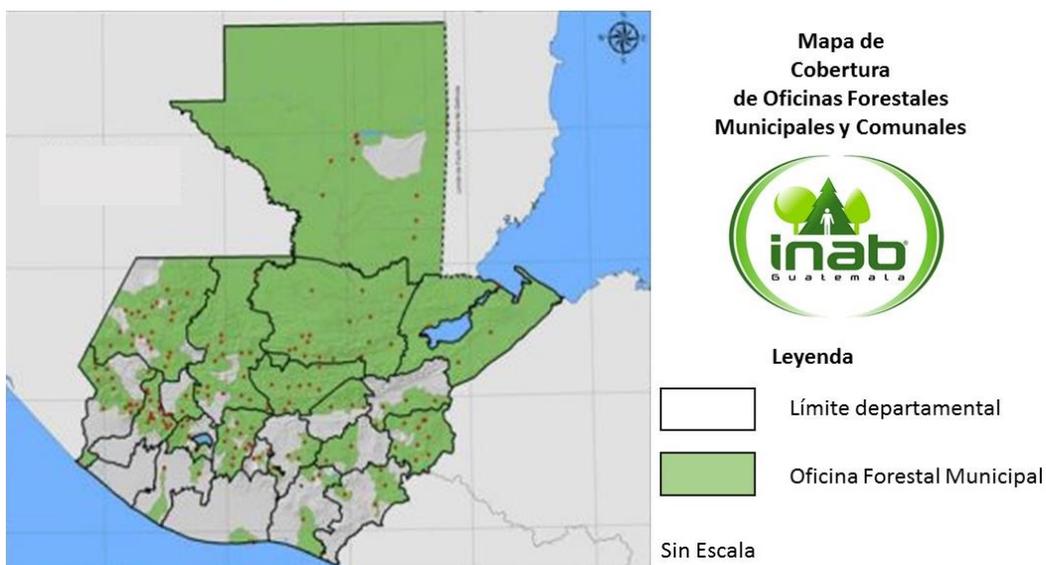
Como fue establecido anteriormente, las propiedades mecánicas de la madera varían dependiendo de la región en la que es producida, de tal forma que el territorio de Guatemala puede llegar a presentar una innumerable cantidad de variables en cuanto a las características del componente. Por tal motivo es necesario realizar una delimitación del área bajo estudio.

Para esta investigación fue seleccionada la región suroeste del departamento de Chiquimula, específicamente se refiere a bosques pertenecientes geográficamente a los municipios de Ipala y San José La Arada.

Dicha región fue determinada, debido a que en la actualidad y desde hace muchos años, ha sido utilizada para la producción de madera, que culmina en múltiples funciones, siendo la construcción la más común de estas.

Cabe destacar que, según el Instituto Nacional de Bosques –INAB-, la región propuesta no es área protegida y no se encuentra en cercanía de alguna de ellas.

Figura 6. Cobertura a bosques en Guatemala



Fuente: INAB (Escala indicada).

2.2. Selección de la especie

La especie seleccionada para el estudio fue *Pinus Oocarpa Schiede*, conocido también como pino Oocarpa Schie, pino de Ocote o simplemente como pino Oocarpa. La elección de la misma se dio por ser la más abundante en la región bajo estudio y la alta cantidad de madera producida de este género.

Debido a estudios anteriores en otras partes del mundo y sobre todo a la experiencia de quienes trabajan su madera, se sabe que el pino Oocarpa es utilizado comúnmente en procesos constructivos y posee convenientes cualidades estructurales.

2.3. Normativa ASTM para ensayos sobre propiedades mecánicas de la madera

El estatuto utilizado para la realización de ensayos sobre las propiedades mecánicas de la madera, es la norma ASTM D 143. *Standar Test Methods of Small Clear Specimens of Timber* (Métodos de prueba estándar para pequeños especímenes limpios de madera). La misma brinda las directrices necesarias para la fabricación de las probetas y los ensayos de las mismas.

De igual forma, la norma ASTM D 143, es utilizada para ensayos sobre especímenes de madera en el Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-.

2.3.1. Determinación del tipo y número de ensayos

El propósito de esta investigación, es determinar las propiedades mecánicas de la madera de la especie pino Oocarpa, con el fin que pueda ser utilizada para la construcción de vigas tipo I ensambladas, la misma estaría sometida a los esfuerzos de compresión, tensión, corte y flexión.

El Centro de Investigaciones de Ingeniería recomienda que se realice un mínimo de tres pruebas de cada espécimen, para obtener valores representativos. Así mismo, los ensayos se realizarán sobre dos trozas de la misma especie y región, pero de diferente árbol. Por lo tanto, se realizaron 3 ensayos de cada tipo para cada una de las trozas, es decir un total de 24 ensayos, siendo los siguientes:

- 6 pruebas a compresión paralela al grano
- 6 pruebas a tensión paralela al grano
- 6 pruebas a corte perpendicular al grano

- 6 pruebas a flexión estática

2.4. Proceso de clasificación

2.4.1. Asistencia profesional

Para la clasificación de la madera fue necesaria la colaboración y asistencia profesional de un experto con conocimiento acerca del componente a estudiar y con experiencia laboral en la zona bajo estudio. Del Centro Universitario de Oriente, Carrera de Agronomía, se contactó con el catedrático Ing. Mtro. Hugo Ronaldo Villafuerte Villeda, master en Recursos Naturales Renovables y poseedor de contrastada experiencia en el ámbito laboral, académico e investigativo.

Su aporte a la investigación fue, principalmente la de identificar la especie de pino Oocarpa de la región establecida, además de servir como asesor en lo relativo al trato y comportamiento de la madera antes, durante y después de la obtención de la misma. Además, colaboró con la medición del contenido de humedad de las trozas al momento de ser adquiridas.

2.4.2. Adquisición de la madera

Para la obtención de la madera, se compró las trozas en un aserradero que trabaja con madera producida en la región propuesta. Para ello, se eligió el aserradero El Castor, ubicado en el kilómetro 165.6 de la carretera centroamericana CA-10 en el municipio de Chiquimula, Chiquimula. Esta empresa procesa madera de diferentes especies y regiones, entre ellas, la madera de pino Oocarpa extraída de bosques de la región suroeste de

Chiquimula, la cual cuenta con los permisos correspondientes para el manejo de recursos forestales en la región.

Figura 7. Visita al aserradero



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Trozas de pino Oocarpa



Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Clasificación de la especie

El aserradero trabaja con dos especies diferentes de pino; Maximinoi y Oocarpa. La diferencia fundamental entre especies es la altura a la generalmente se desarrollan, puesto que el pino Oocarpa se desarrolla en alturas de 900 a 2400 m.s.n.m. y el pino Maximinoi lo hace de 1500 a 2800 m.s.n.m.

La identificación de la especie de pino Oocarpa, por parte del Ing. Villafuerte, se realizó en función de las características morfológicas y anatómicas observadas, la experiencia acumulada en el trabajo profesional y docente de los cursos forestales impartidos en la carrera de Agronomía del Centro Universitario de Oriente ([ver Anexo A](#)).

Figura 9. **Identificación e instrucción sobre el corte de la madera**



Fuente: elaboración propia.

Como se indicó en la sección 2.3.1., se realizaron las pruebas sobre madera de dos árboles diferentes, para ello se adquirieron dos trozas de la especie pino Oocarpa, las cuales fueron identificadas como troza A y B respectivamente.

Estas poseían las siguientes medidas 10"x10"x10' ([ver Anexo B](#)) y cortadas por la mitad para facilidad de transporte, es decir, el resultado final fue de cuatro trozas de 10"x10"x5'.

Figura 10. **Corte de troza A**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Corte de troza B



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Trozas A y B preparadas para su transporte

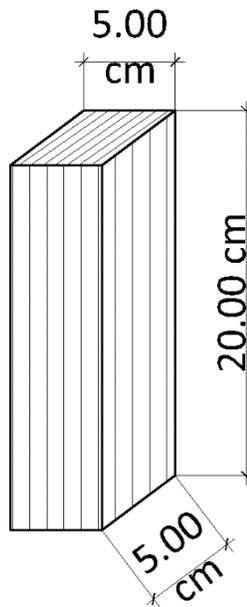


Fuente: elaboración propia.

2.5. Fabricación de probetas con base a ASTM D 143

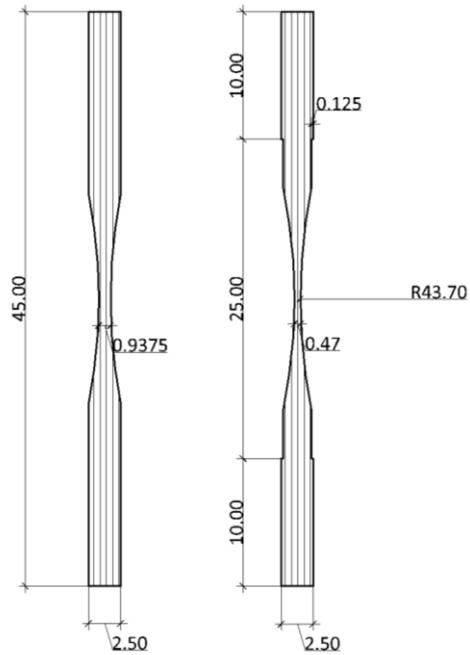
Las probetas fueron fabricadas con base a la norma ASTM D 143 para los cuatro tipos de ensayos requeridos. Así mismo, el Centro de Investigaciones de Ingeniería, por medio de la sección de metales, facilitó las medidas de las probetas para su fabricación. Siendo estas las que se muestran en las figuras 13-16.

Figura 13. **Probeta para ensayo de compresión paralelo a la fibra**



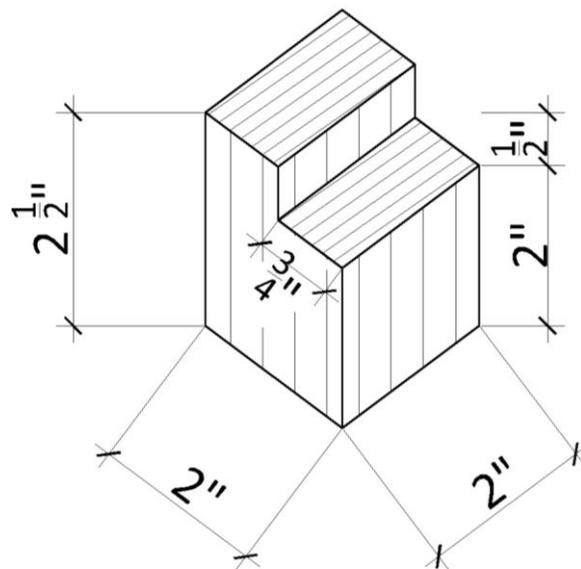
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería (sin escala).

Figura 14. **Probeta para ensayo de tensión paralelo a la fibra**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería (sin escala).

Figura 15. **Probeta para ensayo de corte perpendicular a la fibra**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería (sin escala).

Figura 16. **Probeta para ensayo de flexión estática**



Fuente: elaboración propia (sin escala).

2.5.1. Taller de carpintería

Las trozas A y B fueron llevadas al taller de carpintería ***El Volcán***, ubicado en ***4ta calle 2-32 zona 1 Ipala, Chiquimula***. Ahí se procedió a fabricar las probetas para los ensayos descritos en la sección 2.3.1. Todas las probetas fueron fabricadas a raíz del duramen de las trozas A y B.

Figura 17. **Taller de carpintería para fabricación de probetas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Fabricación de probeta para ensayo de tensión**



Fuente: elaboración propia.

Desde el principio las probetas fueron identificadas como A y B. Una vez fabricadas, se las identificó como A1, A2, A3, B1, B2 y B3 para cada ensayo diferente y en adelante se les identificará de tal manera.

Figura 19. **Identificación de las probetas**



Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Contenido de humedad

Recién compradas, fue medido el contenido de humedad de las trozas A y B, esto se hizo por medio de un Xilohigrómetro portátil modelo WM01 de marca TackLife, propiedad de la Carrera de Agronomía de Cunori y facilitado gratuitamente por el Ing. Villafuerte, para este fin.

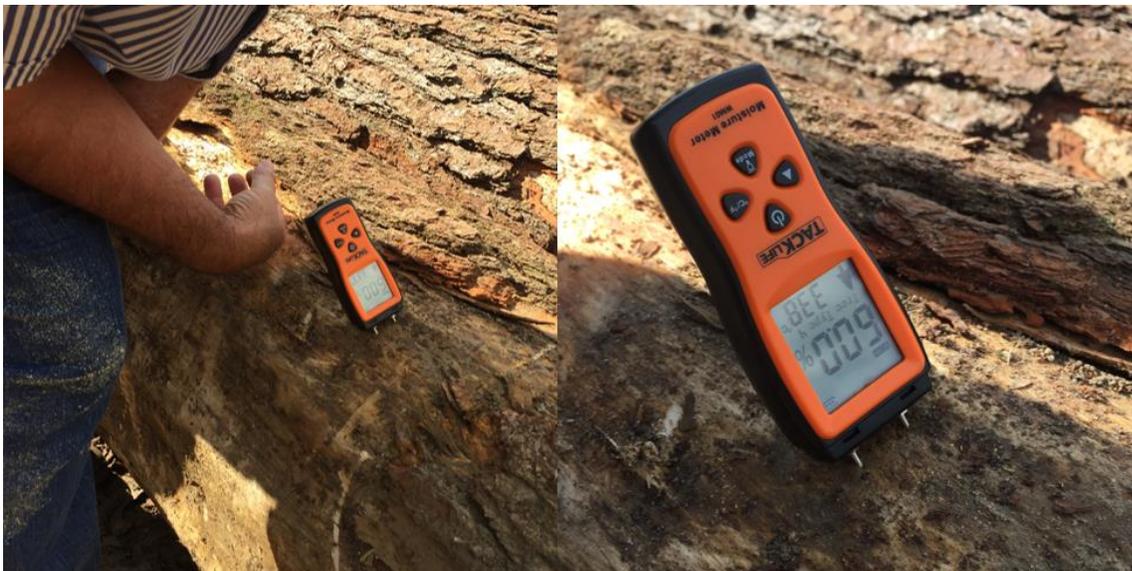
El contenido de humedad de la troza A fue de 54% y el de la troza B de 60%, tal como se evidencia en las figuras 20 y 21 respectivamente.

Figura 20. **Contenido de humedad troza A**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Contenido de humedad de troza B**



Fuente: elaboración propia.

2.5.3. Secado de la madera

Siguiendo las instrucciones de la norma ASTM D 143, se realizó secado de la madera de la siguiente manera:

- Para la fabricación de probetas y facilitar el secado, las trozas A y B fueron cortadas en tablones de 2” de espesor.
- La madera fue colocada bajo una galera metálica lo suficientemente ventilada para acelerar el secado.
- La madera no fue situada directamente bajo la acción del sol, para evitar grietas en la misma.
- Luego de tres semanas de secado, se dispuso a la fabricación de las probetas.
- Recién fabricadas las probetas, estas fueron pesadas y dispuestas para el secado final en un horno, como lo muestra la figura 22, hasta que las mismas alcanzaran un peso constante.

El peso de las probetas húmedas y secas, de acuerdo al ensayo al que serán sometidas, se muestra en las tablas I y II respectivamente.

Tabla I. **Peso de probetas húmedas, en gramos**

Probeta	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Flexión	1,060.00	1,460.00	950.00	1,180.00	1,680.00	1,670.00
Tensión	130.00	130.00	120.00	140.00	115.00	120.00
Compresión	350.00	260.00	280.00	320.00	340.00	310.00
Corte	80.00	70.00	95.00	150.00	150.00	160.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Peso de probetas secas, en gramos**

Probeta	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Flexión	1,010.00	1,140.00	880.00	1,040.00	1,250.00	1,240.00
Tensión	110.00	110.00	110.00	130.00	110.00	110.00
Compresión	280.00	240.00	240.00	290.00	290.00	270.00
Corte	60.00	60.00	60.00	90.00	80.00	80.00

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Secado de probetas en horno**



Fuente: elaboración propia.

3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE PINO OOCARPA DE LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA

3.1. Realización de ensayos a probetas

La estructura de la madera está compuesta por pequeñas unidades fibrosas llamadas células o celdas, las cuales son de forma tubular, formadas de celulosa y cementadas por lignina. Cuando una madera es aserrada puede distinguirse con facilidad la dirección y forma de estas, a las cuales se les conoce como fibras o grano. Las propiedades físicas y mecánicas se ven afectadas, según la forma en la que se da el crecimiento de las fibras dentro del árbol, lo que convierte a la madera en un material ortotrópico, es decir, que posee diferentes propiedades mecánicas, según el sentido ortogonal en el que se analice.

De la misma forma, la mayoría de las propiedades mecánicas de la madera se reducen, según el contenido de humedad de la misma, así como de cualquier irregularidad presente, tales como grietas, nudos, desprendimientos de fibras o putrefacción. Debido a ello, se tuvo especial cuidado en el secado (ver sección 2.5.3.) y tratamiento de la misma.

Las vigas tipo I, se ven sometidas generalmente a esfuerzos a flexión, que a su vez representa esfuerzos de compresión y tensión paralelos a la fibra, y corte perpendicular a la misma. Por tal motivo, se optó por realizar los ensayos de compresión paralelo a la fibra, tensión paralela a la fibra, corte perpendicular a la fibra y flexión estática, tal como se estableció en la sección 2.3.1.

Estos ensayos fueron realizados en el Centro de Investigaciones de Ingeniería, autorizados por medio de la orden de trabajo No. 38,882 ([ver Anexo C](#)). Antes de la realización de los ensayos, todas las probetas fueron pesadas y medidas con precisión de 0.01 mm.

3.1.1. Ensayo de compresión paralelo a la fibra

La madera posee una resistencia relativamente baja a compresión en el sentido paralelo al grano, especialmente comparado con su capacidad a tensión. De igual forma, su límite elástico es un valor bajo y la deformación que presenta previo al colapso de las fibras es pequeña.

El ensayo consiste en someter una probeta de medidas de 5.0x5.0x20.0 cm a la acción de una fuerza de compresión o aplastamiento en la sección transversal paralela a la fibra. Esto se realiza hasta alcanzar el acortamiento de las fibras o la ruptura lateral de la estructura tubular. A la carga que provoca la falla en la probeta se le conoce como carga última.

Figura 23. **Ensayo de compresión paralelo a la fibra**



Fuente: elaboración propia.

A diferencia de los ensayos de tensión o corte, el de compresión es uno de los ensayos con mayor significación práctica en lo referente a la madera, pues los resultados que brinda pueden ser utilizados directamente en funciones estructurales.

Generalmente pueden identificarse fallas por aplastamiento, agrietamiento uniforme, corte, rajadura o la combinación de corte y rajadura. En el caso de las probetas de pino Oocarpa, las fallas más comunes se dieron por aplastamiento y corte ([ver Apéndice 1](#)). Algunas de las probetas presentaban nudos o fragmentos de ellos, sin embargo, su injerencia fue nula.

Figura 24. **Probeta de compresión A1, falla por corte y rajadura**



Fuente: elaboración propia.

Fueron obtenidos mediante los ensayos, los valores de la carga de falla o carga última. Con base a esta carga y al área de la sección transversal real de la probeta, se determina el esfuerzo de compresión presentado en la ecuación 3-1 (Pytel y Singer, 2008):

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3-1)$$

Donde:

σ_c = Esfuerzo último de compresión paralela a la fibra (kg/cm²)

P = Carga última (kg)

A = Área de compresión (cm²)

3.1.2. Ensayo de tensión paralelo a la fibra

Mecánicamente, la resistencia a la tracción paralela a las fibras es la mejor cualidad de la madera. Cuando la tensión es completamente paralela a las fibras esta actúa al máximo de su capacidad. Radicalmente opuesto de la tensión perpendicular a las fibras, la cual para efectos de cálculo suele considerarse como cero.

No obstante, el ensayo de tensión posee menor aplicación práctica que el de compresión. Su limitación en este uso se ve condicionado por la baja capacidad a resistir esfuerzos de corte y la incapacidad de transmitir esfuerzos a otros elementos.

El ensayo consiste someter a tracción, una probeta con una sección transversal en el medio de aproximadamente 0.9375x0.47 cm hasta provocar la ruptura de la misma. La fabricación de las probetas para esta clase de ensayos posee un grado de complicación superior al resto, pues la pequeña sección transversal al medio de la probeta dificulta el proceso.

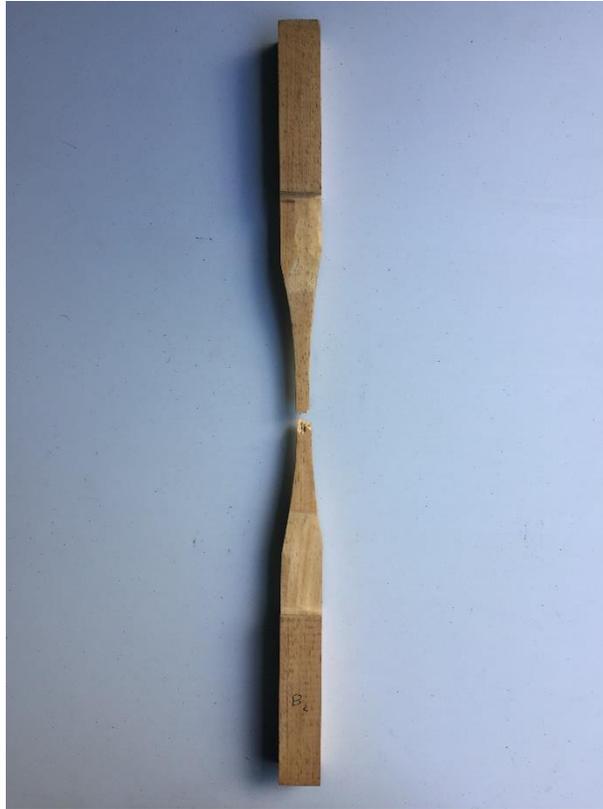
Figura 25. **Ensayo de tensión paralelo a la fibra**



Fuente: elaboración propia.

En la dirección de las fibras, la madera presenta generalmente un comportamiento frágil, es decir, que falla de forma casi abrupta y con escasa deformación previa a la ruptura. Las imperfecciones en su estructura celular tienen un efecto sumamente negativo cuando la madera es sometida a esta clase de esfuerzos, especialmente en lo referente a nudos e inclinación de las fibras. Las probetas de pino Oocarpa analizadas se encontraban libres de nudos y todas ellas presentaron fallas de ruptura frágil, luego de alcanzar la carga última.

Figura 26. **Probeta de tensión B2, falla por ruptura frágil**



Fuente: elaboración propia.

Al igual que el esfuerzo a compresión, el esfuerzo a tensión se obtiene de la relación entre la carga última y el área efectiva a tensión (Pytel y Singer, 2008):

$$\sigma_T = \frac{P}{A} \quad (3-2)$$

Donde:

σ_T = Esfuerzo último de tensión paralela a la fibra (kg/cm²)

P = Carga última (kg)

A = Área de tensión (cm²)

3.1.3. Ensayo de corte perpendicular a la fibra

La madera posee una baja capacidad con respecto al esfuerzo cortante o de cizallamiento, característica que limita la utilización del componente en muchos de los casos. Generalmente se analiza el sentido perpendicular a las fibras por ser el de menor capacidad de corte.

El ensayo consiste en someter una probeta, con una sección transversal a corte de 5.0x5.0 cm, a la acción de una fuerza cortante directa. Esto se logra mediante la utilización de un mecanismo específicamente elaborado para inducir el corte.

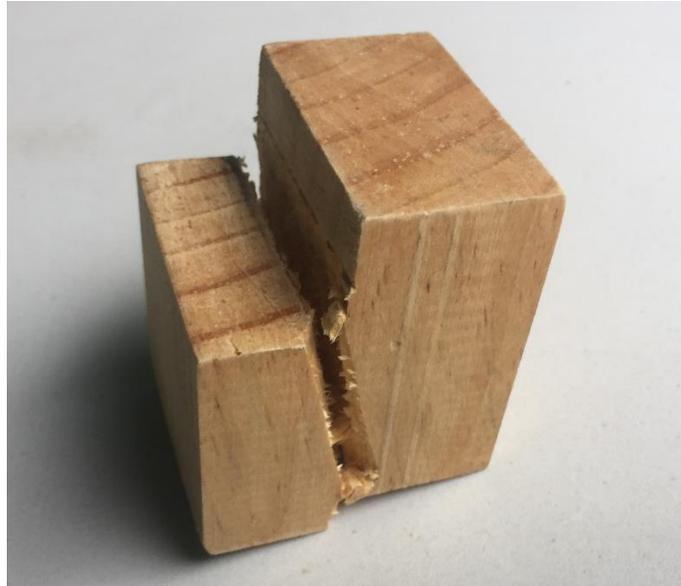
Figura 27. **Ensayo de corte perpendicular a la fibra**



Fuente: elaboración propia.

El tipo de fallas producidas por esta sollicitación suelen ser de corte puro, desgarramiento o hendibilidad. En el caso de las probetas bajo análisis, estas fallaron en su totalidad por desgarramiento de las fibras.

Figura 28. **Probeta de ensayo de corte B2, falla por desgarramiento**



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo máximo de corte se determina mediante la ecuación 3-3 (Pytel y Singer, 2008).

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (3-3)$$

Donde:

τ = Esfuerzo último de corte perpendicular a la fibra (kg/cm^2)

P = Carga última (kg)

A = Área de compresión (cm^2)

3.1.4. Ensayo de flexión estática

La madera posee una adecuada resistencia a la flexión, especialmente por su capacidad de deformación antes llegar a la ruptura, incluso superando su

límite elástico. Esto convierte a la madera en un material flexible, comportándose con bastante ductilidad ante este tipo de solicitaciones.

La presencia de nudos o deformaciones previas, tienen una gran influencia en su capacidad a flexión, reduciendo considerablemente su resistencia, y fallando generalmente en la zona donde estos se encuentran. Por su parte, el contenido de humedad no necesariamente genera disminución en su resistencia, pues las maderas húmedas suelen ser más flexibles que las maderas secas.

El ensayo consiste en someter una barra de 5.0x5.0x76.2 cm, colocada de forma horizontal y simplemente apoyada en los extremos, a la acción de una carga puntual en el medio, con el objetivo de flexionarla y llevarla al aplastamiento de las fibras superiores y la ruptura de las fibras inferiores.

Figura 29. **Ensayo de flexión estática**



Fuente: elaboración propia.

Las fallas más comunes ante este tipo de esfuerzos son fallas por flexión (aplastamiento superior y ruptura inferior), ruptura abrupta o desgarramiento. En

el caso de la madera de pino Oocarpa, las fallas encontradas fueron por flexión y desgarramiento, con excepción de las probetas que presentaban nudos, ya que su influencia provocó fallas de ruptura abrupta justo en la ubicación de estos.

Figura 30. **Probeta de ensayo de flexión estática B1, falla por flexión**



Fuente: elaboración propia.

Para la determinación del esfuerzo máximo a flexión se utiliza la ecuación 3-4 (Pytel y Singer, 2008):

$$F_b = \frac{M}{S} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3-4)$$

Donde:

F_b = Esfuerzo de flexión último (kg/cm^2)

P = Carga última (kg)

L = Longitud entre apoyos (cm)

b = Ancho (cm)

h = Altura (cm)

Fueron tomados datos de deformación a cada 50 kg de fuerza para determinar el módulo de elasticidad, el cual se calcula como con la ecuación 3-5 (Pytel y Singer, 2008):

$$E = \frac{PL^3}{48\varepsilon I} \quad (3-5)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad a flexión (kg/cm²)

P = Carga por debajo del límite elástico (kg)

L = Longitud entre apoyos (cm)

ε = Deformación para la carga P (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

3.2. Procesamiento de datos

Para cada uno de los especímenes analizados, fue determinado el valor del esfuerzo máximo admisible, de acuerdo al ensayo respectivo, así como el módulo de elasticidad del material. Esto se hizo mediante la utilización de las fórmulas presentadas con anterioridad ([ver Apéndice 1](#)).

Posteriormente, la totalidad de datos obtenidos de los ensayos, fueron sometidos a proceso estadístico con el objeto de obtener valores representativos y compactos de los esfuerzos bajo estudio.

3.2.1. Métodos estadísticos

Los resultados fueron procesados por medio de métodos estadísticos descriptivos, de acuerdo con la naturaleza de los datos obtenidos, mediante los ensayos de laboratorio. Para cada tipo de ensayo fueron determinados la media aritmética, la variación estándar y el coeficiente de variación.

3.2.1.1. Cuadro estadístico

Utilizado para el ordenamiento de datos distribuidos por unidad o por intervalos, con el objeto de facilitar la lectura e interpretación de los mismos. Representan la síntesis de los pasos de recopilación, elaboración y análisis de los datos. La tabla III muestra a manera de ejemplo el cuadro estadístico de los esfuerzos de compresión.

Tabla III. **Cuadro estadístico esfuerzo a compresión**

Esfuerzo de compresión kg/cm² (xi)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
234.19	1	234.19	5315.06	5315.06
290.12	1	290.12	288.24	288.24
298.04	1	298.04	82.00	82.00
320.21	1	320.21	172.00	172.00
323.61	1	323.61	272.60	272.60
376.41	1	376.41	4804.23	4804.23
Total	6	1,842.57		10,934.14

Fuente: elaboración propia.

3.3. Presentación de resultados de propiedades mecánicas de la madera

La tabla IV muestra los datos procesados estadísticamente de los ensayos realizados con base a la norma ASTM D 143, sobre las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula. Asimismo, estos valores son los utilizados en los siguientes capítulos (Para consultar la totalidad del proceso estadístico [ver Apéndice 2](#)).

Tabla IV. **Propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula**

Propiedad Mecánica	Valor	Unidad
Compresión	307.10	Kg/m ²
	30,116.22	KPa
Tensión	1,015.04	Kg/m ²
	99,541.42	KPa
Corte	61.93	Kg/m ²
	6,073.26	KPa
Flexión	494.02	Kg/m ²
	48,446.81	KPa
Módulo de elasticidad	87,435.91	Kg/m ²
	8,574,534.00	KPa

Fuente: elaboración propia.

Para consultar el informe emitido por el Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-, acerca de los ensayos de las propiedades mecánicas del material, [ver Anexo D](#).

4. ENSAMBLAJE Y ENSAYOS DE VIGAS TIPO I

4.1. Funcionamiento de vigas tipo I

Las vigas tipo I de madera, también conocidas como perfiles doble T, son perfiles compuestos por una pieza esbelta y alargada que conforma el alma y dos elementos sólidos de sección rectangular, llamados patines o alas, ensamblados en los extremos superior e inferior del alma, con el objeto de aumentar la estabilidad del elemento y generar mayor resistencia a la flexión.

Para la fabricación del alma los elementos utilizados comúnmente son tableros de fibras orientadas OSB (*Oriented Strand Board*), madera contrachapada como el Plywood o madera sólida. En cuanto a los patines, estos generalmente son fabricados de madera sólida simplemente aserrada o estructural. Para esta investigación, tanto alma como patines fueron fabricados de madera sólida aserrada de pino Oocarpa.

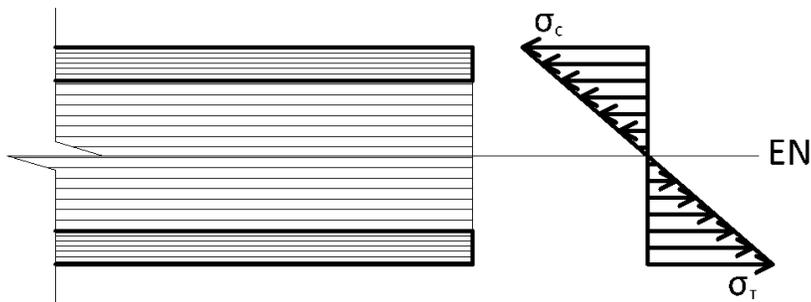
Las vigas tipo I son más eficientes que las vigas de sección rectangular trabajando a flexión, estas requieren menor cantidad de material para su fabricación y su geometría permite utilizarlas en las mismas funciones, con condiciones de carga más exigentes y en longitudes mayores. Así mismo, su sección las hace más livianas y facilita su manipulación. Las mismas pueden ser reforzadas con pasadores de corte o mediante rigidizantes.

Algunas de sus principales desventajas son su radio de giro pequeño del eje débil con respecto al eje de mayor momento de inercia y la vulnerabilidad al pandeo torsional o volteo que esto conlleva.

4.1.1. Esfuerzos de trabajo

Cuando las vigas tipo I trabajan a flexión, estas soportan esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos normales (compresión y tensión) se dan en la parte superior e inferior de las mismas, dependiendo de la dirección del momento flector, sus valores máximos son soportados por los patines, y en perfiles simétricos poseen la misma magnitud uno con el otro. La distribución de los mismos se da de forma lineal con una inclinación de 45° , siendo cero en el eje neutro (tal como se muestra en la figura 31). Además, en la mayoría de los casos, la flexión viene acompañada de esfuerzos cortantes, los cuales suelen ser mayores al centro de la longitud y en la unión alma-patín, debido al cambio abrupto de la sección.

Figura 31. **Distribución de esfuerzos por flexión**



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, el párrafo anterior debe ser interpretado solamente como una descripción ideal de la distribución de esfuerzos provocados al someter cualquier viga a flexión pura, cuando en realidad rara vez se dan con tanta idoneidad, especialmente con un componente tan variable como la madera, en el cual incluso las pequeñas variaciones en la separación y dirección de las fibras o la existencia de nudos tienen amplias repercusiones, tal como la práctica lo

evidencia. Aun así, la distribución descrita brinda una idea general de los esfuerzos esperados durante el diseño.

No obstante, en la mayoría de los casos prácticos, la flexión no actúa solitariamente en las vigas tipo I, pues estas tienden a verse afectadas por esfuerzos de torsión que buscan voltear lateralmente al elemento, generando deformaciones y limitando su capacidad de carga. Adicionalmente, en ocasiones, las vigas también experimentan carga axial de tensión o compresión, en el caso de los elementos de madera generalmente esto no se considera, por la propia imposibilidad de transmitir esfuerzos de tensión del componente.

4.1.2. Aplicaciones

Convencionalmente las vigas de madera fueron ocupadas para funciones de escasa longitud y condiciones de carga relativamente bajas. Sin embargo, en las últimas décadas, con la aparición de perfiles compuestos y normados, se han ampliado los límites del componente. En la actualidad, en países como Estados Unidos o Canadá, las vigas tipo I suelen ser utilizadas en longitudes mayores, ya sea de forma horizontal, inclinada, formando arcos o en voladizo. Son usadas de esta forma para la construcción de viviendas, techos, pérgolas, graneros, naves industriales e incluso edificios. Su elección en muchos de los casos se da por el gran atractivo visual que generan.

Hasta el momento el uso de perfiles tipo I de madera ha sido escaso en Guatemala, en parte, debido a la carencia de estudios estructurales acerca del material y a las creencias sumamente arraigadas en la población acerca de este, pues se le considera un componente anticuado, con capacidad limitada y altamente combustible. No obstante, se ha iniciado a emplear las mismas en

diversas funciones, especialmente como parte de obra falsa en construcción, ya sea para formar andamios o formaletas.

4.2. Fundamentos de diseño

4.2.1. Normativa para ensayos

Para los ensayos de las vigas tipo I, se basó en gran medida en la norma ASTM D 5055. *Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists* (Especificaciones Estándar para el Establecimiento y Monitoreo de Capacidades Estructurales de Vigas I Prefabricadas de Madera). Tal estatuto indica procedimientos para las dimensiones, el ensamblado y las condiciones de carga durante los ensayos de vigas tipo I.

Sin embargo, se aclara que esta investigación no sigue fielmente los lineamientos establecidos en la norma descrita en el párrafo anterior, esto debido a las limitaciones existentes en el Centro de Investigaciones de Ingeniería en cuanto a la longitud y cantidad de vigas analizables. Además, no es objeto de la misma el normalizar medidas estándar o la producción en serie de vigas tipo I, para lo cual la norma mencionada provee gran parte de sus directrices. Es objeto de este trabajo, el establecimiento de un precedente en el campo de la investigación del componente, para el favorecimiento de futuros estudios acerca del tema. Por lo tanto, la norma ASTM D 5055 fue utilizada simplemente como referencia en cuanto al ensamblaje y condiciones de carga de los ensayos.

4.2.2. Conceptos de diseño

Debido a la baja capacidad de la madera de transmitir tensiones y momentos, ya que posee una escasa resistencia al corte, las vigas de este material suelen trabajar simplemente apoyadas, sometidas a esfuerzos de flexión. En estas condiciones, de no existir fuerzas axiales o torsionales, se dice que el elemento está sometido a flexión pura.

La flexión pura es provocada un par de momentos M y M^{-1} , de igual magnitud y opuestos, de la forma que lo muestra la figura 32. Donde el eje neutro de la distribución de esfuerzos, coincide con el centroide de la sección, asumiendo que las secciones a lo largo del eje del elemento son planas e indeformables en el rango elástico de la gráfica esfuerzo-deformación del material.

Figura 32. **Viga sometida a flexión pura**



Fuente: elaboración propia.

Para tales condiciones, según la teoría de la flexión pura, las tensiones máximas producidas son determinadas mediante la ecuación 4-1 (Mott, 2009):

$$\sigma_M = -\frac{M}{S} \quad (4-1)$$

Donde:

σ_M = Esfuerzo máximo provocado por la flexión (kg/cm²)

M = Momento último (kg-cm)

S = Módulo resistente de la sección de la viga (cm³)

El esfuerzo máximo σ_M , será un esfuerzo de tensión si el resultado es una magnitud positiva y compresión si es una magnitud negativa. Asimismo, el módulo resistente de la sección o simplemente módulo de sección, está definido puramente por características geométricas de la misma, como muestra la ecuación 4-2 (Mott, 2009):

$$S = \frac{I}{y_c} \quad (4-2)$$

Donde:

S = Módulo resistente de la sección de la viga (cm³)

y_c = Distancia del eje neutro a la parte superior o inferior de la sección (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

La flexión pura viene acompañada de esfuerzos cortantes, los cuales a su vez provoca tensiones tangenciales. Para la determinación de los mismos se recurre a la teoría de Jouravski-Collignon, para una sección I o doble T establece:

- Tensiones provocadas por corte en patines, ecuación 4-3 (Fliess, 1974):

$$\sigma_T = \frac{Q}{I} \frac{\left\{ \frac{bt}{2}(h-t) + \frac{t_w}{2} \left[\left(\frac{h}{2} - t \right)^2 - y^2 \right] \right\}}{t_w} \quad (4-3)$$

- Tensiones provocadas por corte en el alma, ecuación 4-4 (Fliess, 1974):

$$\sigma_T = \frac{Q}{2I} \left\{ \frac{bt}{t_w} (h - t) + \left[\left(\frac{h}{2} - t \right)^2 - y^2 \right] \right\} \quad (4-4)$$

Donde:

σ_T = Esfuerzo máximo provocado por el corte (kg/cm²)

Q = Fuerza cortante máxima (kg)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

b = Base del patín (cm)

t = Espesor del patín (cm)

h = Altura total de la viga (cm)

t_w = Espesor del alma (cm)

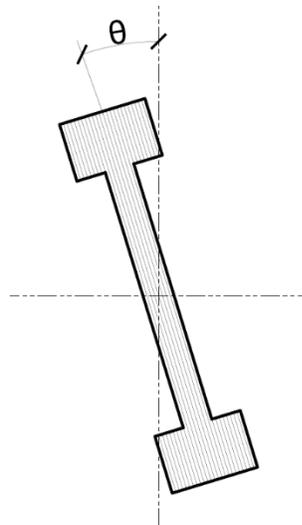
y = Distancia del centroide hacia el punto de análisis (cm)

El momento flector y el esfuerzo cortante, dependen del tipo y magnitud de la carga aplicada. Puesto que se conocen todas las propiedades geométricas de la sección, y las propiedades mecánicas del material fueron determinadas, mediante los ensayos descritos en el capítulo 3, es posible determinar la carga P, ante la cual se dará la ruptura a tensión y el aplastamiento a compresión. Por lo tanto, con base a esta información, puede diseñarse la viga tipo I con las características apropiadas para resistir la flexión pura.

No obstante, cabe mencionar que la carga P a la que se daría la falla por flexión, no es necesariamente la carga de falla de las vigas tipo I. Éstas podrían fallar por diferentes tipos de corte, volteo, alabeo seccional o aplastamiento del alma. De hecho, es conocido que, en vigas tipo I, el parámetro predominante que suele constituir el estado límite de falla es la flexotorsión, que genera un efecto de alabeo o pandeo lateral, como lo muestra la figura 33, el cual consiste en el

volteo o rotación del elemento durante la aplicación de la carga, desarrollando deformaciones que llevan a la falla prematura, siendo estas sumamente complejas en su predicción.

Figura 33. **Pandeo lateral por flexotorsión**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Ensamble de viga tipo I

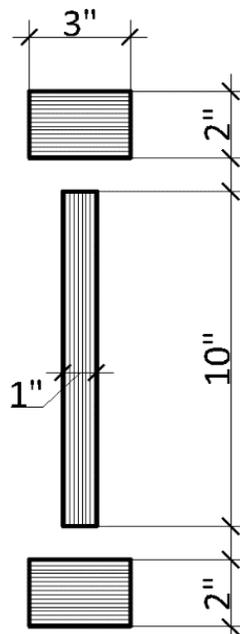
4.3.1. Pre dimensionamiento

Las vigas tipo I de madera, generalmente poseen una sección esbelta de entre 6 a 16" de alto. Se buscan secciones esbeltas, con el objeto de aumentar su inercia y, de tal forma aumentar la capacidad a resistir esfuerzos de flexión. Sin embargo, como se mencionó en la sección 4.2.2., estas secciones tan esbeltas suelen ser susceptibles a deformaciones seccionales como el volteo, debido a la torsión o el alabeo seccional, siendo estos parámetros los que rigen el diseño.

Las dimensiones inicialmente propuestas, fueron basadas en las vigas tipo I que empiezan a ser utilizadas en Guatemala. Estas comúnmente poseen almas con un peralte de 8" a 12" y de 1" a 2 ½" de ancho, con patines de 2" a 4" de alto y de 2 a 4" de ancho, las cuales son consideradas secciones esbeltas.

Con base a esto, se planteó ensayar un alma 10" de alto y 1" de espesor. En lo relativo a los patines, estos se proponen con una sección transversal de 3" de ancho y 2" de alto. En cuanto a la longitud, el Centro de Investigaciones de Ingeniería posee limitaciones en su capacidad de ensayo, por lo cual esta fue de 5 pies de largo. Estas dimensiones corresponden a un perfil sumamente esbelto, electo de tal manera para apreciar los efectos generados por el pandeo lateral por la flexotorsión o alabeo seccional.

Figura 34. **Pre dimensionamiento de vigas**



Fuente: elaboración propia (sin escala).

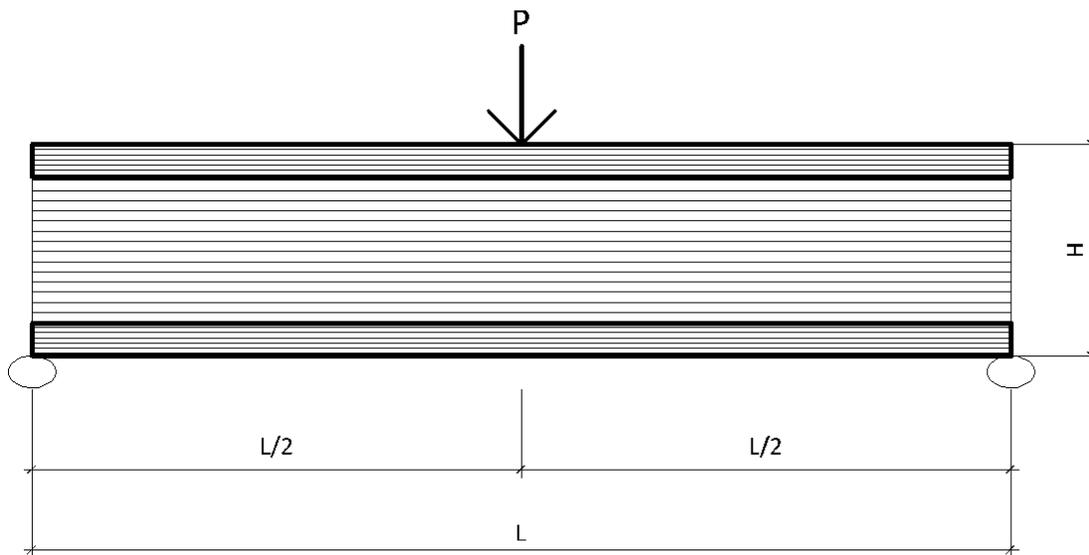
Con el objeto de analizar dos secciones diferentes, se decidió que las vigas provenientes de la troza B, se fabricaran aproximadamente 1.50 cm más

pequeñas que las provenientes de la troza A, y de esta forma evaluar los efectos de la esbeltez en ambos perfiles. Las dimensiones finales de las vigas analizadas pueden consultarse en el [Apéndice 3](#).

4.3.2. Condiciones de carga

Durante los ensayos de las vigas tipo I, estas fueron sometidas dos condiciones de carga diferentes de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM D 5055. El primer escenario consiste en la aplicación de una carga puntal al medio de la luz libre entre apoyos, tal como lo muestra la figura 35.

Figura 35. **Esquema de ensayo a corte en viga I**



Fuente: elaboración propia.

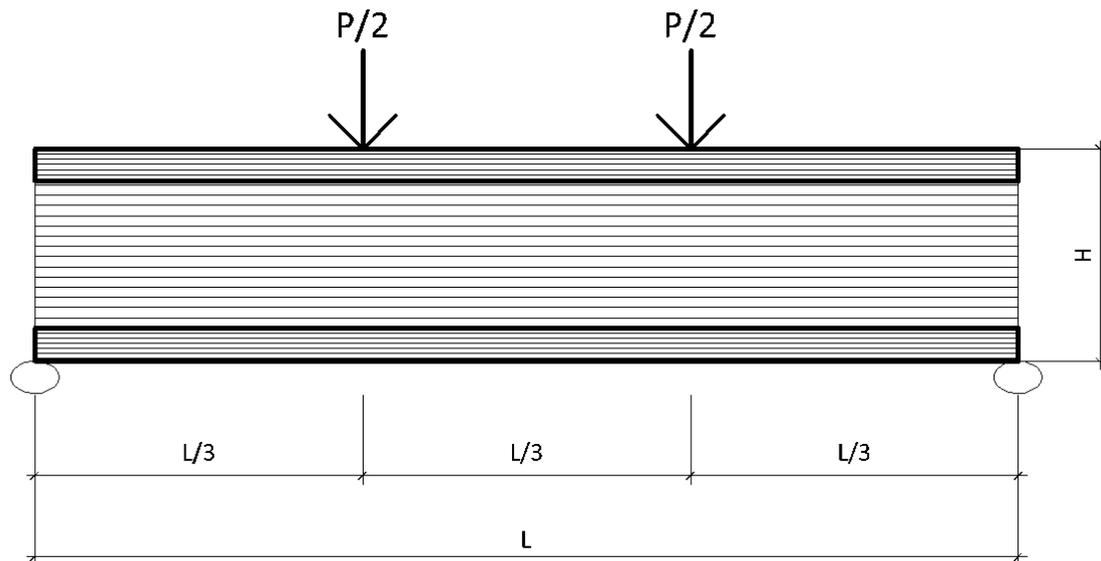
El momento flector y el esfuerzo cortante máximos generados por esta acción, se muestran respectivamente en las ecuaciones 4-5 y 4-6 (Pytel y Singer, 2008):

$$M = \frac{PL}{2} \quad (4-5)$$

$$Q = \frac{P}{2} \quad (4-6)$$

La segunda condición radica en la aplicación de dos cargas puntuales de igual valor en diferentes puntos, separados entre sí a una distancia de un tercio de la luz libre entre apoyos, de igual forma que expone la figura 36.

Figura 36. **Esquema de ensayo a flexión en viga I**



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo cortante no varía en esta condición de carga con respecto a la anterior, y continúa siendo representado mediante la ecuación 4-6. En cuanto al momento flector, este es determinado por medio de la ecuación 4-7 (Pytel y Singer, 2008):

$$M = \frac{PL}{6} \quad (4-7)$$

En las ecuaciones 4-5, 4-6 y 4-7:

M = Momento flector máximo (kg-cm)

Q = Esfuerzo cortante máximo (kg)

P = Carga última (kg)

L = Luz libre entre apoyos (cm)

4.3.3. Deformaciones

Las deformaciones de las vigas cargadas, son fenómenos de interés durante los ensayos, especialmente en lo referente a las deflexiones del elemento, generalmente se busca que éstas sean las más pequeñas posibles, ya que en la utilización de vigas suelen existir limitaciones físicas en obra, además del límite elástico del material. En esta ocasión, la deformación admisible está dada por la ecuación 4-8 (ASTM, 2012):

$$\delta_{adm} = \frac{L}{300} \quad (4-8)$$

Mientras que la deflexión máxima para vigas simplemente apoyadas, cargadas puntualmente en el centro, se estima con la ecuación 4-9 (ASTM, 2012):

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (4-9)$$

Para vigas con dos cargas puntuales separadas a L/3 la deformación máxima es calculada con la ecuación 4-10 (ASTM, 2012):

$$\delta_{max} = \frac{P\left(\frac{L}{3}\right)\left[3L^2 - 4\left(\frac{L}{3}\right)^2\right]}{24EI} \quad (4-10)$$

Donde:

δ_{max} = Deflexión máxima (cm)

P = Carga última (kg)

L = Luz de diseño (cm)

EI = Rigidez experimental determinada (kg-cm²)

Debido a la esbeltez de los perfiles ensayados, se esperan deformaciones laterales. En términos generales, estas deformaciones ocasionadas por la flexotorsión, son representadas a través del módulo de alabeo, el cual se presenta en la ecuación 4-11 (Fliess, 1974):

$$I_w = \frac{h^2 I}{4} \quad (4-11)$$

Donde:

I_w = Módulo de alabeo (cm²)

h = Altura de la viga (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

4.3.4. Fabricación de piezas

Al igual que las probetas para los ensayos de las propiedades mecánicas del pino Oocarpa, la fabricación de las vigas tipo I fue encargada al taller de

carpintería El Volcán. Para ello se brindaron precisas instrucciones en cuanto las dimensiones de las piezas y el ensamble de las mismas.

En total, fueron fabricadas 4 vigas tipo I. De las cuales dos fueron hechas de madera de la troza A y dos de la troza B. (Ver la sección 2.4.3.)

4.3.4.1. Alma

Los tablones utilizados para la fabricación de las almas, fueron extraídos del duramen o corazón de la madera de las trozas A y B. Tal como lo estableció la sección 4.3.1., fueron fabricadas de 1 pulgada de espesor y 10 pulgadas de alto.

Figura 37. Almas de vigas tipo I

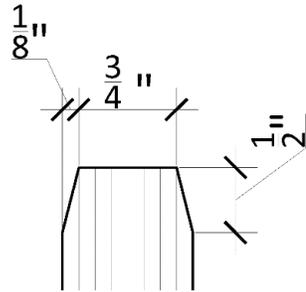


Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, el canto de los tablones fue ajustado a las medidas del ensamble. Este proceso consistió en perfilar uniones macho en los extremos de

los cantos, mediante el corte de una sección triangular de 1/2x1/8" a ambos lados, reduciendo el extremo a 3/4", tal como muestra la figura 38.

Figura 38. **Detalle de canto de alma**



Fuente: elaboración propia (sin escala).

4.3.4.2. **Patines**

Los patines o alas de las vigas tipo I, fueron fabricados con una sección transversal rectangular de 3" de base y 2" de alto. Para ello fueron elegidas las piezas que mostraban mayor consistencia y uniformidad de las trozas A y B, evitando la existencia de grietas, nudos o imperfección alguna.

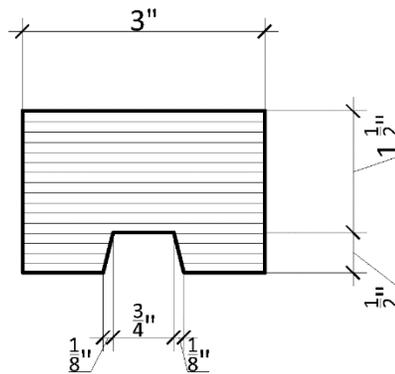
Figura 39. **Fabricación de patines**



Fuente: elaboración propia.

Una vez cepillados y alineados los patines, se procedió a realizar el corte de la unión hembra del ensamble. Para ello se realizó la incisión en forma de canal, de 1/2" de profundidad, con una reducción gradual hasta llegar a 3/4" de ancho en el fondo, tal como lo muestra la figura 40.

Figura 40. **Detalle de patín**



Fuente: elaboración propia (sin escala).

Figura 41. **Patines finalizados**



Fuente: elaboración propia.

Durante el proceso de alineación, cepillado y eliminación de imperfecciones de las piezas, las dimensiones de las almas y los patines sufrieron ligeras variaciones. Los cálculos fueron realizados con base a las medidas reales de cada pieza ([ver Apéndice 3](#)).

4.3.5. Proceso de ensamblaje

La selección del pegamento utilizado, se hizo con base a la comparación de los adhesivos más comunes en el mercado nacional, para aplicación en maderas blandas. Estos fueron comparados en cuanto a: porcentaje de sólidos por volumen, sólidos por peso, viscosidad Brookfield, densidad, humedad máxima de aplicación, tiempo de secado, tipo de aplicación y, sobre todo, la resistencia a la corte ofrecida.

Del anterior análisis, se resolvió emplear para la conexión alma-patín, el pegamento Pegaforte Adhesivo D-1, el cual es especial para maderas blandas como el pino Oocarpa. Según las especificaciones del fabricante, el mismo posee una resistencia al corte de 102-112 kg/cm².

La unión alma-patín de la sección propuesta, tiene un perímetro de contacto de 4.52 cm, al analizar 100 cm de longitud para el cálculo, el área de contacto es de 452 cm². Considerando el valor mínimo de la resistencia del pegamento, es decir, 102 kg/cm², se obtiene una resistencia final al corte de 46,104 kg, lo cual supera por mucho los esfuerzos cortantes esperados previamente, y posteriormente manifestados durante los ensayos.

Una vez definido el área de adherencia y fabricadas las almas y patines, se procedió a realizar el pegado de las piezas. Para ello se aplicó la sustancia adhesiva, utilizando una brocha fina, en las superficies de las conexiones macho

y hembra, seguidamente estas fueron unidas a presión. Para el sostenimiento de la presión constante, fueron empleadas prensas móviles durante un mínimo de dos horas posteriormente a la aplicación del pegamento, de acuerdo con sugerencias del fabricante, ver figura 43. Por último, fueron retiradas las prensas y las vigas I estuvieron dispuestas a su ensayo.

Fueron considerados los parámetros y recomendaciones descritas en la hoja técnica del producto ([ver Anexo E](#)). Para ello fue medido nuevamente el contenido de humedad de la madera, utilizando el Xilohigrómetro de la Carrera de Agronomía de Cunori, presentando un valor promedio de 15%. La temperatura ambiente fue monitoreada constantemente durante el proceso de pegado, variando de 27 a 30 °C, siendo la mayor parte del tiempo de 29 °C.

Figura 42. **Pegado de alma-patines**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. Prensado de vigas



Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Vigas tipo I, finalizadas



Fuente: elaboración propia.

4.4. Ensayo de vigas tipo I ensambladas

Una vez fabricadas las vigas tipo I, se procedió a realizar los ensayos sobre las mismas. Tal como se estableció en la sección 4.3.2., se indujeron dos vigas a falla por corte y dos más a falla por flexión, una de la especie A y otra de la especie B, para cada sollicitación.

4.4.1. Ensayo a corte vigas tipo I

Para este ensayo, según la norma ASTM D 5055, la viga tipo I debe someterse a una carga puntual en el medio de la luz libre entre apoyos hasta llevarla a la falla, tal como lo muestra la figura 45. Este tipo de carga genera las condiciones más severas en cuanto a sollicitudes de corte en el alma y en el cambio de sección entre el alma y los patines del elemento.

Figura 45. **Ensayo a corte en viga tipo I**



Fuente: elaboración propia.

A este ensayo fueron sometidas las vigas A_1 y B_1 . A pesar de haber soportado cargas similares, mostraron fallas diferentes. La viga A_1 presentó una falla ZW, según la clasificación ASTM (2012) ([ver Anexo F](#)), lo que indica una falla por corte cerca de las uniones alma-patín, paralela al patín superior, y corte del alma en un ángulo cercano a los 45° (ver figura 46).

Figura 46. **Falla ZJ en viga A_1**



Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la viga B_1 presentó una falla WRS, es decir, falla por corte en el alma cerca de la unión con el patín superior y paralela a este (Ver figura 47).

Figura 47. **Falla WRS en viga B₁**



Fuente: elaboración propia.

La discrepancia de fallas de las vigas A₁ y B₁, se debió consecuentemente a la diferencia de ambas secciones. Siendo afectada la viga A₁ por pandeo lateral del alma, debido a su esbeltez, lo cual ocasionó una falla prematura. Mientras que la viga B₁, soportó de mejor manera los esfuerzos del ensayo, sin demasiadas deformaciones laterales, demandando una falla paralela a la unión alma patín, debido a la variación de esfuerzos en esa zona.

En cuando a la unión alma-patín, la misma resistió los esfuerzos a los que se vio sometida, no presentando evidencia alguna de desprendimiento.

El esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo puede calcularse con la ecuación 4-12 (Mott, 2009):

$$\sigma_M = -\frac{PL}{2I} y_c \quad (4-12)$$

Donde:

σ_M = Tensión máxima provocada por la flexión (kg/cm²)

P = Carga última (kg)

L = Longitud entre apoyos (cm)

y_c = Altura del eje neutro respecto a la base (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

En cuanto el módulo de elasticidad de la viga, este se determina mediante la ecuación 4-13 (Mott, 2009):

$$E = \frac{23 PL^3}{1.296 I \varepsilon} \quad (4-13)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad de la viga (kg/cm²)

P = Carga por debajo del límite elástico (kg-cm)

L = Longitud entre apoyos (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

ε = Deformación para la carga P (cm)

4.4.2. Ensayo a flexión vigas tipo I

Como se mencionó en la sección 3.1.4., la madera tiene una alta capacidad a deflectarse antes a la ruptura. Sin embargo, en las vigas tipo I, las deflexiones previas a la ruptura fueron mínimas, debido al incremento en la inercia de la sección en comparación con las vigas rectangulares ensayadas en la sección mencionada con anterioridad.

El ensayo consiste en aplicar sobre la viga dos cargas puntuales de igual magnitud, a una distancia equivalente a la tercera parte de la longitud total entre apoyos, tal como se muestra en la figura 48. Según la norma ASTM D 5055, con tales condiciones de carga se logran las máximas sollicitaciones a flexión en el elemento.

Figura 48. **Ensayo a flexión en viga tipo I**



Fuente: elaboración propia.

A este ensayo fueron sometidas las vigas A_2 y B_2 , las cuales presentaron un adecuado comportamiento ante la flexión. La primera de ellas falló por corte WRS, según la clasificación ASTM (2012) ([ver anexo F](#)) esto es, falla por corte en el alma, paralela y cercana a la unión con el patín superior (ver figura 49). En cuanto a la viga B_2 , esta exhibió una falla tipo FB, aplastamiento del patín inferior en uno de los apoyos (ver figura 50).

Figura 49. **Falla WRS en viga A₂**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Falla de viga B₂**



Fuente: elaboración propia.

Al igual que sucedió en el ensayo a corte, la diferencia entre las fallas de las vigas A₂ y B₂, hace referencia a las secciones desiguales. Pues claramente la viga A₂ sufrió volteo lateral, lo cual precipitó su falla. Mientras que la viga B₂, debido a su sección más compacta, no padeció de tal fenómeno, soportando mejor la flexión, hasta llegar al límite de su resistencia por aplastamiento en uno de los apoyos.

Nuevamente, la unión alma-patín soportó de buena manera los esfuerzos ocasionados por el ensayo a flexión, sin mostrar pérdida de adherencia o desprendimiento alguno.

El esfuerzo máximo alcanzado durante el ensayo puede calcularse con la ecuación (Mott, 2009):

$$\sigma_M = -\frac{PL}{6I}y_c \quad (4-14)$$

Donde:

σ_M = Tensión máxima provocada por la flexión (kg/cm²)

P = Carga última (kg)

L = Longitud entre apoyos (cm)

y_c = Altura del eje neutro respecto a la base (cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

En cuanto el módulo de elasticidad de la viga, este puede ser determinado por medio de la ecuación 4-13.

4.5. Presentación de resultados

La tabla V exhibe los resultados obtenidos, mediante los ensayos a corte, con una carga puntual al medio de la luz libre entre apoyos. Por su parte, la tabla VI muestra los resultados de las pruebas a flexión, es decir, con dos cargas puntuales a un tercio de la longitud.

Tabla V. **Resultados de ensayos a corte en vigas I**

Viga	Luz libre (cm)	Carga última (kg)	Momento Inercia (cm ⁴)	Momento último (kg-cm)	Centroide (cm)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Deflexión máxima (mm)
A1	142.00	2,700.00	15,466.97	95,850.00	15.99	99.09	16.50
B1	142.00	2,900.00	11,454.64	102,950.00	15.07	135.40	16.50

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Resultados de ensayos a flexión en vigas I**

Viga	Luz libre (cm)	Carga última (kg)	Momento Inercia (cm ⁴)	Momento último (kg-cm)	Centroide (cm)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Deflexión máxima (mm)
A2	149.50	2,700.00	14,928.46	67,275.00	15.72	70.84	15.50
B2	149.50	3,400.00	11,396.07	84,716.67	14.99	111.44	18.00

Fuente: elaboración propia.

Para consultar el informe emitido por el Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII-, acerca de los ensayos de las vigas tipo I ensambladas en madera, [ver Anexo D](#).

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Propiedades mecánicas de madera de pino Oocarpa

Con base a los ensayos realizados sobre las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa, presentados en el capítulo 3, se determinó que la misma posee una resistencia baja en su capacidad a corte, y media a los esfuerzos de compresión y flexión, mostrándose la resistencia a la tracción como su mejor cualidad mecánica, de la forma que muestra la tabla VII.

Tabla VII. **Consideración de propiedades mecánicas del pino Oocarpa bajo estudio**

Propiedad Mecánica	Valor	Unidad	Consideración
Compresión	307.1	Kg/m ²	Media
Tensión	1,015.04	Kg/m ²	Alta
Corte	61.93	Kg/m ²	Baja
Flexión	494.02	Kg/m ²	Media
Módulo de elasticidad	87,435.91	Kg/m ²	Media

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, a pesar de su alta aptitud a esfuerzos de tensión, esta cualidad difícilmente puede ser explotada, como se hizo mención en la sección 3.1.2., su baja facultad a cortante limita la capacidad de transmitir esfuerzos de tracción de un elemento hacia otro, no siendo este caso la excepción. Por ello se consideran las propiedades a compresión y flexión como las cualidades más prácticas del componente estudiado.

Ciertamente, la madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula no puede ser considerada como una madera de alta resistencia, sin

embargo, su utilización en procesos constructivos es viable desde el punto de vista estructural. Dicha consideración se incrementa al tomar en cuenta la vasta producción existente de esta especie y el relativo bajo costo que posee en comparación con otras maderas.

Los nudos resultaron ser de gran injerencia en el material, reduciendo ampliamente su resistencia, ocasionando fallas abruptas en las zonas de ubicación de estos, especialmente evidenciado en los ensayos de flexión, la cual se vio muy limitada, debido a la existencia de los mismos. Las probetas para ensayos de tracción se encontraban libres de nudos, sin embargo, se deduce con base al comportamiento en los ensayos de flexión el efecto sumamente negativo que estos tendrían en su resistencia. En cuanto al esfuerzo a compresión, el efecto de los nudos no tuvo mayor injerencia en el comportamiento de las probetas durante los ensayos, ni disminuyó de forma considerable su resistencia.

En comparación con maderas duras, como la de roble, cerezo, castaño, olivo o nogal, la del pino Oocarpa es una madera blanda y poco fibrosa, esto ocasionó que la misma sufriera escasas deformaciones previo a la ruptura, la cual en la mayoría de los casos fue de forma fragosa. De igual forma, estas características hicieron que se adaptara de buena manera al adhesivo utilizado para el ensamble de las vigas tipo I.

Adicionalmente, tal madera presentó una buena predisposición al secado, perdiendo humedad a razón de 0.75 %/día, utilizando únicamente métodos naturales. Debe tenerse especial cuidado este aspecto, pues si el proceso de secado no se realiza forma adecuada, tal madera tiende a generar ocote, debido a los altos contenidos de resina que posee, lo cual la convierte en sumamente quebradiza e inutilizable para funciones estructurales. Tal efecto es

especialmente evidente en los nudos, aunque no se limita solamente a estos, y convierte al componente en altamente combustible.

5.2. Ensayos sobre vigas tipo I

Tal como se expuso en el capítulo 4, se realizó dos tipos de ensayos sobre las vigas tipo I: una prueba con una carga puntual al medio y la otra con dos cargas puntuales distanciadas a un tercio de la longitud libre entre apoyos. En el primero de los casos, se buscaba una mayor exigencia a corte, y con el segundo, se buscaba amplificar el momento flector, según las especificaciones de ASTM D 5055.

En términos generales, los ensayos se desarrollaron con normalidad, y la conducta de las vigas tipo I, se dio en concordancia con lo esperado previamente, de acuerdo a la sección de las mismas. La carga última soportada y el esfuerzo último alcanzado en cada una de las vigas ensayadas, definido mediante la ecuación 4-1, se presenta en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Cargas y esfuerzos últimos en vigas tipo I**

Viga	Carga última (kg)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Tipo de ensayo
A1	2,700.00	99.09	Carga puntual al medio.
B1	2,900.00	135.40	Carga puntual al medio.
A2	2,700.00	70.84	Dos cargas puntuales a L/3.
B2	3,400.00	111.44	Dos cargas puntuales a L/3.

Fuente: elaboración propia.

Puesto que en ninguno de los ensayos se alcanzaron los esfuerzos máximos de compresión y/o tensión determinados en el capítulo 3, para el material utilizado, resulta evidente que las fallas de las vigas I no se dieron,

debido a las tensiones tangenciales ocasionados por el momento flector y los esfuerzos cortantes.

Para estimar la carga P máxima a la cual se produciría la falla, debido a los esfuerzos de compresión y/o tensión, con base a la teoría de flexión pura, se utilizó las ecuaciones 5-1 y 5-2, las cuales, a su vez, son una derivación de la ecuación 4-1 (Mott, 2009).

- Para ensayo con una carga puntual a L/2:

$$P = \frac{2I\sigma_M}{Lv_c} \quad (5-1)$$

- Para ensayo con dos cargas puntuales a L/3:

$$P = \frac{6I\sigma_M}{Lv_c} \quad (5-2)$$

Donde:

P = Carga última (kg)

σ_M = Esfuerzo máximo provocado por la flexión (kg/cm²)

M = Momento último (kg-cm)

I = Momento de inercia de la sección respecto al eje neutro (cm⁴)

y_c = Distancia del eje neutro a la parte superior o inferior de la sección (cm)

L = Luz libre entre apoyos (cm)

Del capítulo 3, se sabe que: el esfuerzo máximo a compresión es 307.10 kg/cm², y el esfuerzo máximo a tensión es 1,015.04 kg/cm². Con base a esta información, es posible determinar la carga P a la que se produciría la falla a

compresión y a tensión, debidas al momento flector. Si, adicionalmente, se considera las tensiones tangenciales provocadas por el esfuerzo cortante, por medio de las ecuaciones 4-3 y 4-4, se obtiene la carga última para los esfuerzos normales, cuyos resultados aproximados se presentan en la tabla IX.

Tabla IX. **Cargas teóricas de falla por flexión y corte para los esfuerzos normales**

Viga	Compresión teórica (kg)	Tensión teórica (kg)	Carga de falla experimental (kg)
A1	7,300.00	23,900.00	2,700.00
B1	5,900.00	19,400.00	2,900.00
A2	9,500.00	31,500.00	2,700.00
B2	9,300.00	30,700.00	3,400.00

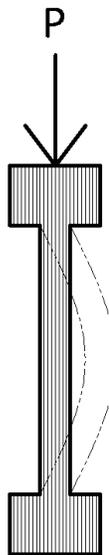
Fuente: elaboración propia.

Ciertamente, los esfuerzos experimentales alcanzados, se aproximaron más a los esfuerzos de compresión que a los de tensión. No obstante, los resultados mostrados de en la tabla IX, no solamente reafirman lo ya evidenciado en la tabla VIII, además muestran qué tan lejos se estuvo de alcanzar los valores máximos de compresión y tensión durante las pruebas, y como la flexión y el corte no rigen las fallas en las vigas tipo I.

En los ensayos, las cargas puntuales actuaban intentando flexionar el elemento con respecto a su eje de mayor momento de inercia. Como es bien sabido, el momento flector ocasionó compresión en el patín superior y tensión en el patín inferior. Sin embargo, se adelantó en la sección 4.2.2., el estado límite de falla en las vigas tipo I suelen ser el pandeo lateral por flexotorsión.

Este tipo de pandeo se genera especialmente cuando el patín en compresión, o la viga en general, carece de soportes laterales. De esta forma, las vigas se deforman con respecto al eje horizontal sin restricción alguna. De manera que las cargas aplicadas no coinciden con el eje del alma y actúan directamente contra esta, flexionándola y retorciéndola lateralmente, precipitando de esta forma las fallas de los elementos. Este tipo de deformación es también conocido como alabeo de la sección o alabeo seccional, mostrado en la figura 51.

Figura 51. **Esquema de alabeo seccional**



Fuente: elaboración propia.

Tal efecto fue visualmente evidente durante los ensayos de las vigas tipo I, especialmente en las pertenecientes a la troza A (A_1 y A_2). Sin embargo, el tipo de pandeo lateral fue ligeramente diferente en ambas, pues en la viga A_1 , el alma se retorció hasta fracturarse abruptamente (ver figura 52), mientras que la viga A_2 sufrió volteo, el cual que terminó por fracturar la unión del alma con el patín superior (ver figura 53). De tal forma que, el efecto producido por este fenómeno

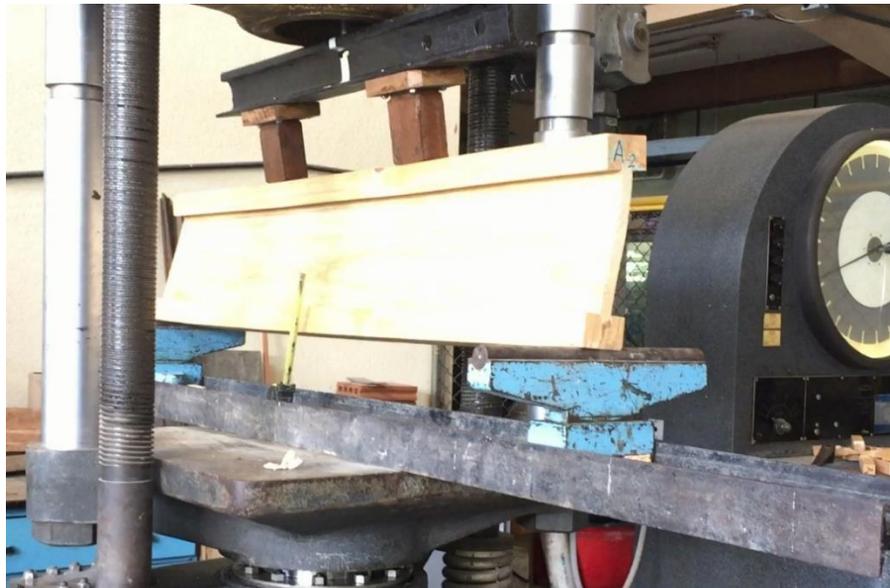
se vuelve sumamente complejo de predecir y es solo mediante ensayos prácticos como puede ser estudiado.

Figura 52. Alabeo seccional en viga A₁



Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Alabeo seccional en viga A₂



Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que, las vigas provenientes de la troza B (B_1 y B_2), no sufrieron de forma tan evidente los efectos de pandeo lateral por flexotorsión y resistieron cargas mayores a las vigas de la troza A, aun cuando durante los ensayos de las propiedades mecánicas del material, ambas trozas mostraron resistencias similares.

Esto se debió a que las vigas B_1 y B_2 eran ligeramente más pequeñas que las vigas A_1 y A_2 , siendo aproximadamente 1.50 cm más reducidas ([ver apéndice 3](#)). A pesar de poseer un menor momento de inercia con respecto al eje de carga, soportaron mayor carga de flexión y no se vieron tan afectadas por los efectos del pandeo lateral por flexotorsión.

Figura 54. **Deformación a flexión viga B_1 .**



Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Fractura en apoyo de viga B₂.



Fuente: elaboración propia.

Esto demuestra que el pandeo lateral por flexotorsión tiene mayor repercusión cuando el eje sobre el cual se supone la flexión tiene un momento de inercia varias veces mayor que el momento de inercia en el sentido perpendicular, es decir, según la esbeltez del elemento, y si además la resistencia de la sección a la torsión es baja. Al ser las vigas de la troza B de menor altura, consecuentemente eran secciones más compactas, con un módulo de alabeo seccional menor, como lo muestra la tabla X, con base a la ecuación 4-11.

Tabla X. Módulo de alabeo de vigas I

Viga	I (cm ⁴)	h viga (cm)	Alabeo seccional (cm ²)	Alabeo seccional (m ²)
A1	15,466.97	31.85	3,922,509.37	392.25
B1	11,454.64	30.10	2,594,504.13	259.45
A2	14,928.46	31.40	3,679,715.03	367.97
B2	11,396.07	30.10	2,581,238.34	258.12

Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que, el efecto de pandeo lateral por flexotorsión no afecta a perfiles de sección circular, circular hueca o rectangulares. Siendo su efecto tangible en perfiles abiertos como las secciones tipo I, T o C. El mismo puede iniciarse dentro del intervalo elástico del material o fuera de este, dependiendo del peralte del elemento y la susceptibilidad a sufrir sus efectos. En caso de esta investigación, tal fenómeno se dio antes de alcanzar el límite elástico, puesto que las secciones fueron sumamente esbeltas.

Durante las pruebas realizadas sobre los perfiles ensamblados tipo I, se terminó estudiando los efectos del pandeo lateral por flexotorsión y quedó más que en manifiesto el enorme efecto que tiene en estas secciones, siendo este el parámetro que rige el diseño de este tipo de vigas.

Como se mencionó con anterioridad, el efecto de alabeo seccional se da debido a la carencia de soportes laterales en las vigas. Para evitar este tipo de fallas, debe de proveerse de restricciones laterales a las vigas tipo I, ya sea en forma de breizas o proveyendo secciones más compactas, las cuales han probado ser más eficientes. En los casos de aplicación real cuando las vigas son destinadas para soporte de losas macizas, prefabricadas, losa acero o incluso cubiertas de madera, el efecto de alabeo no tendría amplias repercusiones, debido a que estos elementos proveen de un soporte lateral, siempre y cuando puedan ser considerados como diafragmas rígidos.

En marcos estructurales, el problema se evita al poseer condiciones de apoyo diferentes a las que se tuvieron durante las pruebas, las cuales se encontraban simplemente apoyadas, al tener uniones adecuadas entre vigas y columnas. También ayuda a ello la colocación de vigas secundarias en el sentido perpendicular a las vigas principales.

En consecuencia, en condiciones de carga con vigas simplemente apoyadas, resulta más eficiente la utilización de perfiles con menor esbeltez, con un alma más reducida, para explotar de mayor manera las propiedades a compresión, tensión y flexión del material.

Como se vio anteriormente, con base a la información obtenida, mediante los ensayos de las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa del capítulo 3, puede obtenerse el momento último de las vigas tipo I, trabajando bajo la acción de un momento flector y esfuerzos cortantes. Con tal información, se determinan las cargas admisibles de las vigas I ensayadas, en función de la longitud de las mismas, para ello se utiliza la ecuación 5-3 (ASTM, 2012):

$$P_{adm} = \frac{4M}{L^2} \quad (5-3)$$

Donde:

P_{adm} = Carga admisible distribuida (kg/m)

M = Momento último (kg/m)

L = Longitud de la viga (m)

La utilización de la ecuación 5-3 es viable únicamente en las condiciones de carga del ensayo a flexión, con dos cargas puntuales a L/3. Es decir, los practicados sobre las vigas A₂ y B₂. Los resultados de tal análisis se presentan en la tabla XI.

Tabla XI. **Cargas admisibles, según la longitud de la viga**

Longitud (m)	Momento de A₂ (kg-m)	Momento de B₂ (kg-m)	Carga admisible A₂ (kg/m)	Carga admisible B₂ (kg/m)
1.00	2,367.08	2,317.25	9,468.33	9,269.00
1.50	2,367.08	2,317.25	4,208.15	4,119.56
2.00	2,367.08	2,317.25	2,367.08	2,317.25
2.50	2,367.08	2,317.25	1,514.93	1,483.04
3.00	2,367.08	2,317.25	1,052.04	1,029.89
3.50	2,367.08	2,317.25	772.93	756.65
4.00	2,367.08	2,317.25	591.77	579.31
4.50	2,367.08	2,317.25	467.57	457.73
5.00	2,367.08	2,317.25	378.73	370.76
5.50	2,367.08	2,317.25	313.00	306.41
6.00	2,367.08	2,317.25	263.01	257.47
6.50	2,367.08	2,317.25	224.10	219.38
7.00	2,367.08	2,317.25	193.23	189.16
7.50	2,367.08	2,317.25	168.33	164.78
8.00	2,367.08	2,317.25	147.94	144.83
8.50	2,367.08	2,317.25	131.05	128.29
9.00	2,367.08	2,317.25	116.89	114.43
9.50	2,367.08	2,317.25	104.91	102.70
10.00	2,367.08	2,317.25	94.68	92.69
10.50	2,367.08	2,317.25	85.88	84.07
11.00	2,367.08	2,317.25	78.25	76.60
11.50	2,367.08	2,317.25	71.59	70.09
12.00	2,367.08	2,317.25	65.75	64.37

Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que, en este caso, se tomó en cuenta la viga I trabajando a flexión y corte, sin la consideración de los efectos, debidos al pandeo lateral por flexotorsión. Es decir, asumiendo el trabajo de la misma con algún tipo de soporte lateral que limite los efectos del alabeo. Por lo tanto, este corresponde a un análisis puramente teórico.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla XI, se establece la viabilidad de la hipótesis inicial de la investigación. Pues es manifestado que el uso de vigas tipo I, ensambladas con madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, con una sección como la analizada en el capítulo 4, es estructuralmente viable para longitudes de hasta 6.00 metros, soportando cargas distribuidas mayores de los 250.00 kg/m.

Según la magnitud de la carga soportada, las vigas tipo I analizadas en el capítulo 4 tendría una aplicación real para soportar cubiertas metálicas, rieles de carga o entresijos de madera. Estando sobre capacitadas para su uso como pérgolas o techos de lámina. De igual forma podrían ser utilizadas como parte de obra falsa, ya sea para formar andamios o como formaleta.

En cuanto al tipo de conexión utilizada, esta se mostró efectiva ante los dos tipos de ensayos realizados, pues en ningún caso se encontró evidencia de desprendimiento o pérdida de adherencia de cualquier tipo, en la unión alma-patín.

Como es previsible, el cambio abrupto de sección del alma al patín, genera concentración de esfuerzos, por lo cual se trata de una zona con especial exigencia. Sin embargo, la concentración de esfuerzos fracturo el alma de las vigas, antes de llegar a la carga que iniciara el desprendimiento de la conexión, tal como lo muestran las figuras 56 y 57.

Con base a esta evidencia, se considera acertado el uso del pegamento Pegaforte Adhesivo D-1 y el tipo de conexión macho-hembra fabricada. Pues la combinación de ambos factores, proveyó a las vigas de suficiente uniformidad, homogeneidad y resistencia a los esfuerzos generados.

Figura 56. **Falla paralela a la unión alma patín de viga B₁**



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Falla paralela a la unión alma patín de viga A₂**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula fue clasificada con ayuda de la Carrera de Agronomía del Centro universitario de Oriente, con base a las características morfológicas y anatómicas observadas, así como la experiencia acumulada en el trabajo profesional y docente de cursos forestales.
2. Las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa son: compresión paralela a fibra, 307.10 kg/cm², con un coeficiente de variación de 13.90%; tensión paralela a la fibra, 1,015.04 kg/cm², con un coeficiente de variación de 10.80%; corte perpendicular a la fibra, 61.93 kg/cm², con un coeficiente de variación de 12.42%; flexión estática, 494.02 kg/cm², con un coeficiente de variación de 29.95%; y módulo de elasticidad, 87,435.91 kg/cm², con un coeficiente de variación de 29.95%.
3. El diseño propuesto de vigas tipo I ensambladas en madera fue realizado con base a la teoría de flexión pura y las propiedades mecánicas de la madera de pino Oocarpa, obtenidas mediante ensayos mecánicos.
4. Los ensayos a dos vigas tipo I, bajo la acción de una carga puntual aplicada al medio de la luz libre entre apoyos, presentaron una carga última de 2,700.00 y 2,900.00 kg; mientras que los dos ensayos ante la acción de dos cargas puntuales separadas a un tercio de la luz entre sí, tuvieron una carga última de 2,700.00 y 3,400.00 kg.
5. Estructuralmente, la madera de pino Oocarpa puede ser utilizada como perfil tipo I, para longitudes de hasta 6.00 metros libres, con una carga

distribuida de hasta 250.00 kg/m, lo cual en casos prácticos correspondería a cubiertas metálicas, rieles de carga, entresijos de madera o como obra falsa, para andamios o formaleas.

6. Debido a la esbeltez de las secciones de las vigas tipo I, el fenómeno que constituyó el estado límite de las fallas fue el pandeo lateral por flexotorsión, deformando a los elementos lateralmente y ocasionando una ruptura precoz en los mismos, sin llegar a evaluarse su capacidad real a la flexión.
7. De las dos secciones analizadas de vigas tipo I, las fabricadas con una sección de menor peralte, mostraron una mejor disposición a soportar los esfuerzos generados durante los ensayos, en comparación con las secciones más esbeltas, las cuales sufrieron fallas prematuras al verse mayormente afectadas por el pandeo lateral por flexotorsión.
8. Con este trabajo, se crea un precedente en el estudio de perfiles ensamblados con madera sólida aserrada en Guatemala, con ello se puede partir para futuros estudios, ya que genera múltiples líneas de investigación.

RECOMENDACIONES

1. Verificar las propiedades mecánicas del pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, durante la planificación técnica, previo al uso del material en procesos constructivos, determinadas en esta investigación.
2. Para generar elementos con mayor disposición a trabajar bajo solicitudes de flexión y corte, se debe considerar el pandeo lateral por flexotorsión en el diseño de vigas de madera ensambladas en perfiles abiertos como los I, T, C o H.
3. La reducción de los efectos del pandeo lateral por flexotorsión puede lograrse limitando el peralte de las vigas, generando secciones más compactas. O en su defecto, proveer de soportes laterales que restrinjan el alabeo de la sección, ya sea con adecuadas conexiones viga-columna, con la utilización de diafragmas rígidos o mediante vigas secundarias.
4. Seguir íntegramente las indicaciones de la norma ASTM D 5055, para establecer perfiles precalificados tipo I ensamblados en madera y la producción masiva de los mismos.
5. En el caso del uso de perfiles ensamblados de madera en la intemperie o en contacto con agua, se debe utilizar un pegamento diferente al empleado en esta investigación, Pegaforte Adhesivo D-1, pues el mismo no está capacitado para desarrollar la capacidad completa de su resistencia en condiciones de constante humedad.

6. El tipo de conexión utilizada en esta investigación puede ser variada en futuros estudios, según las solicitudes y demandas que se busquen comprobar. Las mismas deben ser diseñadas con base a la capacidad a corte del pegamento utilizado y la sección del ensamble entre elementos. Debido a la dificultad de encontrar trozas de madera de gran longitud sin nudos o deformaciones que limiten su capacidad a resistir esfuerzos, pueden realizarse ensambles longitudinales que permitan aumentar el largo de las vigas. Tales ensambles deberán ser diseñados, según los esfuerzos máximos esperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aja, R. (2006). *Destilación de la resina de pino ocote (Pinus Oocarpa schiede ex Schlttdl) extraída de Granados, Baja Verapaz, para la obtención y caracterización de colofonia (Rosyn) a nivel laboratorio*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- ASTM. (2012). *D 143: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. West Conshohoken, Pennsylvania.
- ASTM. (2012). *D 5055: Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists*. West Conshohocken, Pennsylvania.
- Barrios, E., Contreras, W., Owen, M., Sosa, M., & Styles, W. (2012). *Ensayos mecánicos de vigas compuestas de madera tipo I: LS&E-1 para uso estructural*. Caracas: Revista Forestal Venezolana.
- Castillo, W. (2004). *Propiedades Mecánicas del Pinus Patula Schiede*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Coronel, L. P. (s.f.). *Descripción anatómica de la madera de siete especies del género pinus*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- De La Roca, E. (2010). *Guía para la elaboración y presentación de proyectos de investigación*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro de Investigaciones en Psicología.

Estrada, N. (1997). *Elaboración de tablas de volumen general para Pinus Oocarpa y Pinus maximinoi, del bosque del Uyuca, El Zamorano, Honduras*. Escuela Agrícola Panamericana, departamento de recursos naturales y conservación biológica.

Fliess, E. (1974). *Estabilidad, segundo curso*. Buenos Aires: KAPELUSZ, S.A.

Godínez, W. (1996). *Ingeniería de la madera en Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.

Graciano, J., Méndez, J., Nájera, J., & Vargas, Z. (2005). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera en Quercus Laeta Liemb, de El Salto, Durango*. México D.F.: Universidad Autónoma Indígena de México.

Hermoso Prieto, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de pinus sylvestris L*. Madrid: Departamento de Industrias Forestales.

Martínez, I., & Vignote, S. (2005). *Tecnología de la madera*. España: Ediciones Mundi-Prensa.

Messer, O. (2007). *Comportamiento en flexión de vigas laminadas que incorporan Pino oregón*.

Moreno, J., & Moya, R. (2006). *Propiedades físico-mecánicas de la madera de Tectona grandis Linn. F. (teca), proveniente de una plantación de ocho años de edad en Cochabamba, Bolivia*. Costa Rica: Revista Forestal Kurú.

Mott, R. (2009). *Resistencia de materiales* (Quinta Edición ed.). University of Dayton.

- Olvera, L. (1985). *Descripción Anatómica de la Madera de Siete Especies del Genero Pinus*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Ortíz, L. (2008). *Vigas de madera horizontales para proyectos habitacionales, en arquitectura*. Guatemala: Facultad de Arquitectura, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pytel y Singer. (2008). *Resistencia de materiales* (Cuarta ed.). Oxford University.
- Rivas Boch, C., & Joachin Bautista, J. (2006). *Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de cuatro especies de madera del Petén*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- Sampieri, R. (2010). *Metodología de la Investigación, quinta edición*. McGraw Hill.
- Serrano Montero, R., & Sáenz Muñoz, M. (2006). *Tecnología e innovación de estructuras de madera para el sector de la construcción: Vigas de perfil I de amarillón de plantación*. Costa Rica: Revista Forestal Kurú.
- Spiegler, C. (1981). *Comportamiento inicial del Pinus Oocarpa Schiede, asociado con cultivos anuales*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- Vásquez, L., Hernández, G., Campos, R., Elgueta M., P., & González R., M. (2015). *Caracterización mecánica de vigas I de madera*. Santiago de Chile: Instituto Forestal Chileno. Área de tecnología y productos de la madera.

Viña, F. (1996/1997). *La madera como material de expresión plástica. Análisis estructural y tratamiento en escultura para interior y exterior*. España: Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales. Universidad de La Laguna.

APÉNDICES

- Apéndice 1** Resultados de ensayos a sobre madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, según norma ASTM D 143.
- Apéndice 2** Proceso estadístico de resultados obtenidos, mediante ensayos sobre probetas de madera de pino Oocarpa.
- Apéndice 3** Geometría de las vigas tipo I fabricadas.

Apéndice 1

Resultados de ensayos a sobre madera de pino Oocarpa de la región suroeste de Chiquimula, según norma ASTM D 143.

Tabla XII. **Resultados ensayo a compresión paralelo a la fibra**

Probeta	Ancho (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Tipo de falla
A1	4.952	4.915	5,700.00	234.19	Corte y Rajadura a 45°
A2	4.944	4.950	7,100.00	290.12	Aplastamiento de fibras
A3	4.897	4.964	9,150.00	376.41	Aplastamiento de fibras
B1	4.922	4.949	7,800.00	320.21	Aplastamiento de fibras
B2	4.935	4.902	7,210.00	298.04	Corte a 45°
B3	4.935	4.928	7,870.00	323.61	Corte a 45°

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados ensayo a tensión paralelo a la fibra**

Probeta	Ancho (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Tipo de falla
A1	0.614	0.942	625.00	1,080.59	Ruptura frágil
A2	0.524	0.899	525.00	1,114.47	Ruptura frágil
A3	0.525	0.849	425.00	953.50	Ruptura frágil
B1	0.638	0.912	600.00	1,031.18	Ruptura frágil
B2	0.573	0.870	400.00	802.39	Ruptura frágil
B3	0.616	0.879	600.00	1,108.11	Ruptura frágil

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados ensayo a corte perpendicular a la fibra**

Probeta	Ancho (cm)	Altura (cm)	Carga (kg)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Tipo de falla
A1	4.994	5.086	1,300.00	51.18	Desgarramiento de fibras
A2	4.997	5.106	1,675.00	65.65	Desgarramiento de fibras
A3	5.019	5.102	1,500.00	58.58	Desgarramiento de fibras
B1	4.976	5.086	1,775.00	70.14	Desgarramiento de fibras
B2	5.079	5.091	1,410.00	54.53	Desgarramiento de fibras
B3	4.983	5.092	1,815.00	71.53	Desgarramiento de fibras

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados ensayo a flexión estática**

Probeta	Ancho (cm)	Altura (cm)	Longitud (cm)	Luz (cm)	Carga última (kg)	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Tipo de falla
A1	4.935	4.975	76.10	71.70	180.00	158.49	Ruptura abrupta
A2	4.985	4.997	76.20	71.70	650.00	561.62	Flexión pura
A3	4.957	4.980	76.30	71.70	400.00	349.94	Ruptura abrupta
B1	4.956	4.950	76.20	71.70	850.00	752.81	Flexión pura
B2	5.015	4.998	76.20	71.70	450.00	386.33	Desgarramiento
B3	5.016	5.005	76.20	71.70	490.00	419.41	Desgarramiento

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Deformaciones en ensayo a flexión estática**

Carga (kg)	A1 (mm)	A2 (mm)	A3 (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	B3 (mm)
50.00	3.0	1.0	2.0	0.5	1.0	1.0
100.00	0.0	1.5	3.5	1.0	1.5	2.0
150.00	0.0	2.0	5.0	2.0	2.0	3.5
200.00	0.0	2.5	6.0	2.5	3.0	4.5
250.00	0.0	3.5	7.5	3.5	4.0	5.5
300.00	0.0	4.0	9.5	4.0	5.5	7.0
350.00	0.0	5.5	10.0	5.0	7.0	8.0
400.00	0.0	6.0	13.0	6.0	8.0	9.5
450.00	0.0	7.0	0.0	7.0	10.0	11.0
500.00	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	0.0
550.00	0.0	10.0	0.0	9.0	0.0	0.0
600.00	0.0	13.0	0.0	10.0	0.0	0.0
650.00	0.0	18.0	0.0	12.0	0.0	0.0
700.00	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Módulo de elasticidad con base a deformaciones de tabla XVI**

Carga (kg)	A1 (kg/cm²)	A2 (kg/cm²)	A3 (kg/cm²)	B1 (kg/cm²)	B2 (kg/cm²)	B3 (kg/cm²)
50.00	25,274.34	74,075.44	37,629.68	153,302.97	73,588.13	73,265.19
100.00	S/E	98,767.26	43,005.35	153,302.97	98,117.51	73,265.19
150.00	S/E	111,113.17	45,155.62	114,977.23	110,382.20	62,798.74
200.00	S/E	118,520.71	50,172.91	122,642.38	98,117.51	65,124.62
250.00	S/E	105,822.06	50,172.91	109,502.12	91,985.17	66,604.72
300.00	S/E	111,113.17	47,532.23	114,977.23	80,277.96	62,798.74
350.00	S/E	94,277.84	52,681.55	107,312.08	73,588.13	64,107.05
400.00	S/E	98,767.26	46,313.45	102,201.98	73,588.13	61,697.01
450.00	S/E	95,239.86	S/E	98,551.91	66,229.32	59,944.25
500.00	S/E	92,594.31	S/E	95,814.36	S/E	S/E
550.00	S/E	81,482.99	S/E	93,685.15	S/E	S/E
600.00	S/E	68,377.33	S/E	91,981.78	S/E	S/E
650.00	S/E	53,498.93	S/E	83,039.11	S/E	S/E
700.00	S/E	S/E	S/E	71,541.39	S/E	S/E

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2

Proceso estadístico de resultados obtenidos, mediante ensayos sobre probetas de madera de pino Oocarpa.

Tabla XVIII. **Proceso estadístico compresión paralelo a la fibra**

Esfuerzo Compresión (xi)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
234.19	1	234.19	5,315.06	5,315.06
290.12	1	290.12	288.24	288.24
298.04	1	298.04	82.00	82.00
320.21	1	320.21	172.00	172.00
323.61	1	323.61	272.60	272.60
376.41	1	376.41	4,804.23	4,804.23
Total	6	1842.57		10934.14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Proceso estadístico tensión paralelo a la fibra**

Esfuerzo a Tensión (xi)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
1,080.59	1	1,080.59	4,296.67	4,296.67
1,114.47	1	1,114.47	9,886.19	9,886.19
953.50	1	953.50	3,786.90	3,786.90
1,031.18	1	1,031.18	260.58	260.58
802.39	1	802.39	45,219.76	45,219.76
1,108.11	1	1,108.11	8,661.35	8,661.35
Total	6	6,090.24		72,111.46

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Proceso estadístico corte perpendicular a la fibra**

Esfuerzo corte (xi)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
51.18	1	51.18	115.61	115.61
54.53	1	54.53	54.82	54.82
58.58	1	58.58	11.27	11.27
65.65	1	65.65	13.79	13.79
70.14	1	70.14	67.27	67.27
71.53	1	71.53	92.10	92.10
Total	6	371.61		354.86

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Proceso estadístico flexión estática**

Esfuerzo flexión (xi)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
158.49		Descartado por injerencia de nudo.		
349.94	1	349.94	20,759.96	20,759.96
386.33	1	386.33	11,597.48	11,597.48
419.41	1	419.41	5,566.74	5,566.74
561.62	1	561.62	4,568.95	4,568.95
752.81	1	752.81	66,972.98	66,972.98
Total	5	2,470.11		109466.12

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Proceso estadístico módulo de elasticidad**

Módulo de elasticidad (x)	f	fxi	(xi-μ)²	f(xi-μ)²
25,274.34		Descartado por injerencia de nudo		
111,113.17	1	111,113.17	560,612,467.27	560,612,467.27
50,172.91	1	50,172.91	1,388,531,399.17	1,388,531,399.17
114,977.23	1	114,977.23	758,524,288.44	758,524,288.44
98,117.51	1	98,117.51	114,096,581.25	114,096,581.25
62,798.74	1	62,798.74	606,990,294.58	606,990,294.58
Total	5	437,179.56		3,428,755,030.70

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3

Geometría de las vigas tipo I fabricadas.

Tabla XXIII. Geometría, vigas tipo I

Viga	Longitud (cm)	h (cm)	d (cm)	tw (cm)	tfs (cm)	bfs (cm)	tfi (cm)	bfi (cm)
A1	152.40	31.85	21.89	2.01	5.000	7.580	4.960	7.500
A2	152.40	31.40	21.44	2.01	5.000	7.550	4.960	7.550
B1	152.40	30.10	21.90	2.00	4.090	6.970	4.110	6.920
B2	152.40	30.10	21.96	1.99	4.040	6.910	4.100	6.960

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

- Anexo A** Constancia de selección de trozas de pino Oocarpa, Ing. Hugo Villafuerte.
- Anexo B** Factura de compra de madera de pino Oocarpa.
- Anexo C** Orden de trabajo del Centro de Investigaciones de Ingeniería No. 38882.
- Anexo D** Informe de Centro de Investigaciones de Ingeniería - CII- acerca de los ensayos realizados de: compresión paralela a la fibra, flexión estática, corte perpendicular a la fibra, tensión paralela a la fibra, ensayo a flexión con una carga puntual al medio y ensayo a flexión con dos cargas puntuales a L/3.
- Anexo E** Hoja técnica de Pegaforte Adhesivo D-1.
- Anexo F** Caracterización de fallas en vigas tipo I, según ASTM D 5055.

Anexo A

Constancia de selección de trozas de pino Oocarpa, Ing. Hugo Villafuerte.

 USAC TRICENTENARIA <small>Universidad de San Carlos de Guatemala</small>	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE CARRERA AGRONOMÍA	 U AGRONOMIA CUNORI USAC
---	--	--

REF. HRVV-03-2018
Chiquimula, 04 de septiembre 2018

MSc. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director de Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguido maestro Álvarez Cotí:

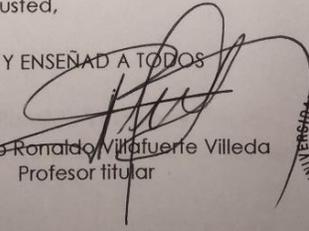
Por este medio me dirijo a usted, para manifestarle que he procedido a acompañar al **Ing. Gilberto de Jesús Guerra Flores**, quién se identifica con el carné **No. 200946235**, en la selección de dos trozas de madera de la especie Pino de ocote o **Pinus oocarpa** Schie, producidas en bosques de la región suroeste de Chiquimula. La identificación de la especie indicada se realizó en función de las características morfológicas y anatómicas observadas, la experiencia acumulada en el trabajo profesional y docente de los cursos forestales que se imparten en la carrera de Agronomía del Centro Universitario de Oriente CUNORI.

La madera de las dos trozas será utilizada para realizar las correspondientes pruebas de laboratorio en el Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII- de la Facultad de Ingeniería, USAC, para fundamentar la investigación denominada: **"DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGIÓN SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I"**, cuyos resultados se analizarán en su tesis de maestría en Estructuras.

En el afán de apoyar la investigación se le propone al maestrante analizar la madera joven y madura que conforma las trozas obtenidas de los árboles, porque la madera de la parte externa, cercana a la corteza tiene menor densidad y lignificación, por lo que se espera que sus características físicas y mecánicas sean diferentes.

Sin otro particular, me suscribo de usted,

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"


MSc. Hugo Ronaldo Villafuerte Villeda
Profesor titular


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
CHIQUIMULA
AGRONOMIA

CUNORI 78730300 AGRONOMÍA EXT. 1016

Anexo B

Factura de compra de madera de pino Oocarpa.

ASERRADERO EL CASTOR		FACTURAS SERIE B
 <p> ASERRADERO EL CASTOR KILOMETRO 165.6 CARRETERA A GUATEMALA CHIQUIMULA, CHIQUIMULA NELVIN DONALDO TUPA MOLINA NIT: 1159157-9 </p>		<p>Nº 004786</p> <p>SUJETO A PAGOS TRIMESTRALES</p> <p>DIA MES AÑO 05 / 09 / 20 18</p>
Teléfonos. 4500 0188 / 5785 2552		
NOMBRE: <u>Bilberto Guerra</u>		NIT: <u>8072478-7</u>
DIRECCIÓN: <u>Ipala, Chiquimula.</u>		
CANT.	DESCRIPCION	VALOR
2	10 x 10 x 10	832. =
1	2 x 6 x 10	45. =
		
<small>AUTORIZACION SEGUN RESOLUCION No. 2018-1-61-164626 DEL 19 / 01 / 2018 No. 3,801 AL 4,800 VIGENTE HASTA 18 / 01 / 2020 IMPRENTA Y OFFSET MAYA PRINT, CHIQUIMULA NIT. 3499641-9 TEL. 7942-1605</small>		TOTAL Q. <u>877. =</u>

Anexo C

Orden de trabajo del Centro de Investigaciones de Ingeniería No. 38,882.

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, C.A.

NO COBRABLE
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA

ORDEN DE TRABAJO N° 38882

LABORATORIO DE: Metales.

INTERESADO: Gilberto de Jesús Guerra Flores FECHA: 20/08/2018
PROYECTO: Determinación de las Propiedades Mecánicas de La Madera de la Especie Pino Oocarpa Producida en la Región Suroriente de Guatemala y su aplicación en vigas ensambladas Tipo I. Teléfono: 54766023
DIRECCIÓN: 3-32 Zona 5, Ipala, Chiquimula.
MUESTRA/EQUIPO: 28 Probetas. Especimen Pino Oocarpa.

Proveedor/Marca y Modelo: _____

16.9 Flexión (8 Probetas), 16.7 Compresión (6 Probetas)
TRABAJO A EFECTUAR:
16.4 Tensión (6 Probetas), 16.6 Corte (8 Probetas)

COSTO DEL TRABAJO: Observaciones: _____

Materiales	Q	_____
Mano de Obra	Q	_____
Total	Q	7116.00

INFORME No. _____ JEFE DE SECCIÓN _____

TRABAJO O INFORME RECIBIDOS POR: COSTO: Q. _____

(f) _____ RAZÓN: _____
Nombre: _____ Guatemala, _____ de _____ de 200_____

Original: Control Secretaría CII (Trabajo terminado)
Duplicado: Laboratorio que efectúa el trabajo.
Triplicado: Control inmediato Secr.

RECIBO: _____ Fecha: _____

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref. EPFI-509-2018
Agosto de 2018.
INVESTIGACIONES DE INGENIERIA USAC
AGOSTO 2018
11:40
diarias.
programa de tesis quien se le labora en el laboratorio: 3 siendo estos vigas tipo I
investigación "LA MADERA DE LA MADERA EN SUROESTE DE GUATEMALA TIPO I".

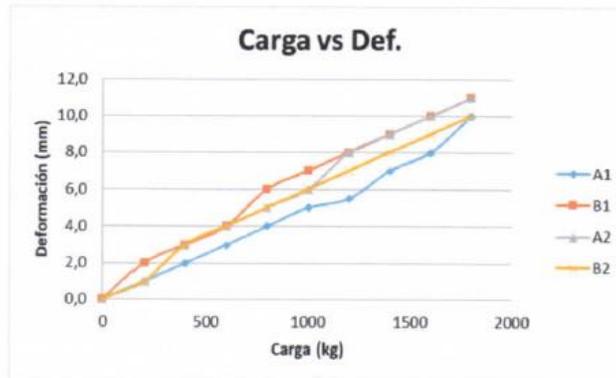
Anexo D

Informe de Centro de Investigaciones de Ingeniería -CII- acerca de los ensayos realizados de: compresión paralela a la fibra, flexión estática, corte perpendicular a la fibra, tensión paralela a la fibra, ensayo a flexión con una carga puntual al medio y ensayo a flexión con dos cargas puntuales a $L/3$.



O.T. No. 38882 INFORME No. 297-M
 INTERESADO: GILBERTO DE JESUS GUERRA FLORES
 PROYECTO: DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA DE LA ESPECIE PINO OOCARPA PRODUCIDA EN LA REGION SUROESTE DE CHIQUIMULA Y SU APLICACIÓN EN VIGAS ENSAMBLADAS TIPO I
 ASUNTO: ENSAYO DE FLEXION, COMPRESION PARALELA, TENSION PARALELA Y CORTE PERPENDICULAR.
 FECHA: GUATEMALA, 05/11/2018.

Deformación en mm				
Carga (kg)	A1	B1	A2	B2
0	0.0	0.0	0.0	0.0
200	1.0	2.0	1.0	1.0
400	2.0	3.0	3.0	3.0
600	3.0	4.0	4.0	4.0
800	4.0	6.0	5.0	5.0
1000	5.0	7.0	6.0	6.0
1200	5.5	8.0	8.0	7.0
1400	7.0	9.0	9.0	8.0
600	8.0	10.0	10.0	9.0
800	10.0	11.0	11.0	10.0



Ensayo Carga puntual al medio

	Luz entre apoyos (cm)	Carga última (kg)	I (cm ⁴)	M (kg-cm)	Centroide (cm)	Esfuerzo último (kg/cm ²)
A1	142.000	2700.000	15466.97	95850.00	15.99	99.09
B1	142.000	2900.000	11454.64	102950.00	15.07	135.40

Ensayo Dos Cargas puntuales a L/3

	Luz entre apoyos (cm)	Carga última (kg)	I (cm ²)	M (kg-cm)	Centroide (cm)	Esfuerzo último (kg/cm ²)
A2	149.500	2700.000	14928.46	67275.00	15.72	70.84
B2	149.500	3400.000	11396.07	84716.67	14.99	111.44

SECCIÓN METALES Y PRODUCTOS MANUFACTURADOS



Anexo E

Hoja técnica de Pegaforte Adhesivo D-1.

INFORMACIÓN TÉCNICA



PEGAFORTE ADHESIVO D-1

525-23001-000

DESCRIPCIÓN

525-23001-000 es un adhesivo multiuso especialmente formulado para el pegado de maderas suaves. Ofrece excelente adherencia en una amplia gama de sustratos, pero no es resistente al agua, por lo que requiere de refuerzos. Su alta viscosidad lo hace especial para superficies porosas.

USO

Puede utilizarse para manualidades en papel, cartón y madera, así como para la fabricación de muebles y puertas. Debe reforzarse con machimbres, clavos, tornillos o grapas corrugadas o planas.

Línea Línea Doméstica, Línea Industrial/Profesional

CARACTERÍSTICAS

VALORACIÓN

	Apariencia	Líquido lechoso
PROPIEDADES FÍSICAS		DATOS
Sólidos por Volumen (%)		37 - 39
Sólidos por peso (%)		40 - 42
Peso por galón (kg/gal):		3,85 - 4,05
Viscosidad Brookfield (cps)		18,000 - 20,000
Densidad (g/ml (kg/l))		1,02 - 1,07
Humedad máxima de la madera %		15%
Tiempo abierto maximo		10 min

PRESENTACIÓN

PRESENTACIONES DISPONIBLES

Envase plástico de 0,12 Litros = 4 Onzas líquidas

Envase plástico de 8 onzas = 236 ml.

Envase plástico de 0,946 Litros = 1/4 de Galón.

Envase plástico de 18,925 Litros = Balde (cubeta) de 5 galones

Estos datos técnicos fueron calculados bajo condiciones controladas de laboratorio, pero SUR QUIMICA no tiene ningún control sobre las condiciones, las herramientas, la mano de obra utilizada ni la selección, preparación o compatibilidad de los productos utilizados; por lo tanto solo da garantía de la calidad del producto, la idoneidad de sus características y cualidades, pero no es responsable de los resultados obtenidos en condiciones imposibles de comprobar una vez hecho el trabajo. SUR QUIMICA ha hecho lo razonablemente posible para garantizar la veracidad de la información proporcionada aquí, pero no asume responsabilidades por ningún error, omisión o inexactitud de ella.

Versión 1.1 del: Oct 10/7/2016
7 2016 4:21PM



INFORMACIÓN TÉCNICA



PEGAFORTE ADHESIVO D-1

525-23001-000

Envase plástico de 208,175 Litros = Barril (estafión) de 55 galones.

Envase plástico de 1000 kg (tote tank)

Envase plástico de 3,785 Litros = 1 Galón

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

CONDICIÓN	INSTRUCCIÓN
Preparación de superficie:	Antes de aplicar el adhesivo, las superficies deben estar secas y libres de grasa, aceite, polvo o cualquier otro contaminante.
Cepillar la madera:	La madera debe de cepillarse previo a la aplicación del adhesivo.

PREPARACIÓN DEL PRODUCTO

COMPONENTE	PARTES	INSTRUCCIONES DE MEZCLA
Producto: 525-23001-000 - PEGAFORTE ADHESIVO D-1	100%	Producto listo para usar. No requiere dilución.

APLICACIÓN DEL PRODUCTO

PUEDE SER APLICADO CON



Estos datos técnicos fueron calculados bajo condiciones controladas de laboratorio, pero SUR QUÍMICA no tiene ningún control sobre las condiciones, las herramientas, la mano de obra utilizada ni la selección, preparación o compatibilidad de los productos utilizados; por lo tanto solo da garantía de la calidad del producto, la idoneidad de sus características y cualidades, pero no es responsable de los resultados obtenidos en condiciones imposibles de comprobar una vez hecho el trabajo. SUR QUÍMICA ha hecho lo razonablemente posible para garantizar la veracidad de la información proporcionada aquí, pero no asume responsabilidades por ningún error, omisión o inexactitud de ella.

Versión 1.1 del: Oct 10/7/2016
7 2016 4:21PM



INFORMACIÓN TÉCNICA



PEGAFORTE ADHESIVO D-1

525-23001-000

Herramientas

El producto puede ser aplicado con brocha, pincel, espátula o rodillo, una vez aplicado unir firmemente las piezas en la posición deseada y deje secar.

Instrucciones de aplicación

Madera: Se recomienda dar un mínimo de 4 horas de secado en sargento o prensa, en clima húmedo ese tiempo debe aumentarse en 6 horas más, debido a la humedad ambiental y a la humedad de la madera.
El producto cura por completo después de 7 días, desarrollando todas sus características físicas.
Las piezas deben dejarse en reposo de 8 a 12 horas antes de manipularlas.
La limpieza de sobrantes de adhesivo se realiza con una tela limpia húmeda antes de que seque, siguiendo la dirección de la junta, para que la lija no se embote.

Papel o Cartón:
Aplique una capa uniforme en las piezas a pegar y deje secar.

OBSERVACIONES

- Si necesita otra información, uno de nuestros Técnicos le atenderá con gusto. Llámenos al 800-SUR-2000 o envíenos un correo a servicioalcliente@gruposur.com.
- Para aplicar este producto el sustrato debe de estar entre los 20 ° C y 35 ° C.
- Para mantener su buen desempeño, este producto debe almacenarse en lugar ventilado, fresco y bajo techo, en su envase original bien tapado
- Temperaturas bajas y alta humedad ambiente y de la madera, retardan el proceso de secado.
Agite el producto antes de utilizar.

SALUD

- Evite el contacto con la piel e inhalar sus vapores.
- Para un uso seguro de este producto solicite la hoja de seguridad del mismo (MSDS).
- Si necesita disponer de los envases vacíos de nuestros productos en Costa Rica, acuda a su tienda Sur Color o a nuestro complejo industrial en La Uruca, San José.

Estos datos técnicos fueron calculados bajo condiciones controladas de laboratorio, pero SUR QUÍMICA no tiene ningún control sobre las condiciones, las herramientas, la mano de obra utilizada ni la selección, preparación o compatibilidad de los productos utilizados; por lo tanto solo da garantía de la calidad del producto, la idoneidad de sus características y cualidades, pero no es responsable de los resultados obtenidos en condiciones imposibles de comprobar una vez hecho el trabajo. SUR QUÍMICA ha hecho lo razonablemente posible para garantizar la veracidad de la información proporcionada aquí, pero no asume responsabilidades por ningún error, omisión o inexactitud de ella.

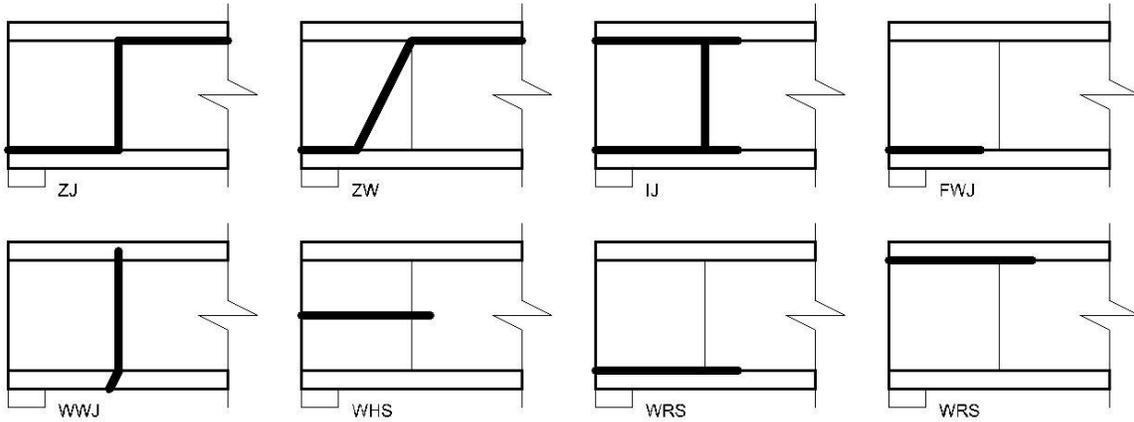
Versión 1.1 del: Oct 10/7/2016
7 2016 4:21PM



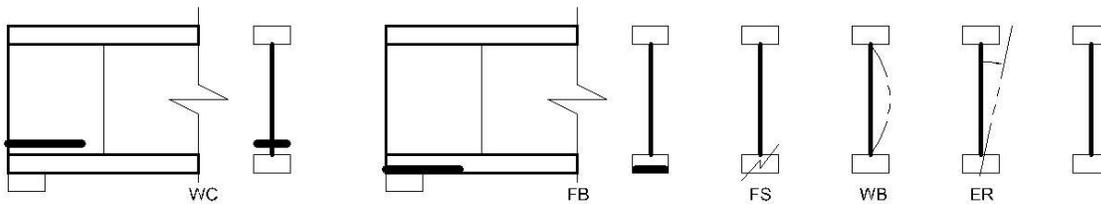
Anexo F

Caracterización de fallas en vigas tipo I, según ASTM D 5055.

Fallas típicas de corte



Fallas típicas últimas



Fallas típicas de flexión

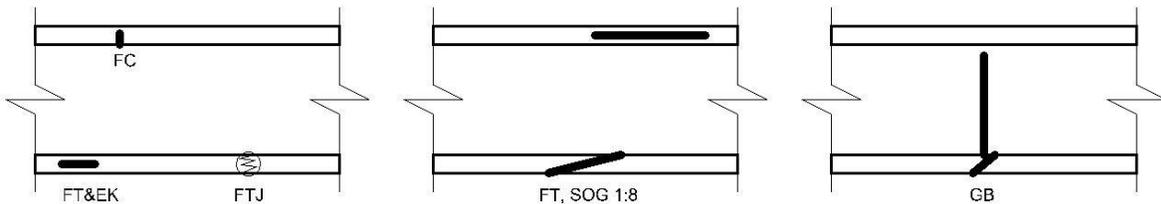


FIG. X5.2 Códigos de falla para pruebas de escala completa