



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**Facultad de Ingeniería
en Tecnología de la Madera**



**División de Estudios de Posgrado
Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera**

***Diseño y determinación de flexión estática
en piezas estructurales de madera.***

Tesis

Para Obtener el Grado de:

Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

Arq. Israel Macedo Alquicira

Asesor:

Dr. José Cruz de León

Sinodales:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Dr. Jorge Enrique Ambriz Parra

M.C. Roberto Calderón Muñoz

M.C. Isaac Alfaro Trujillo

Morelia, Michoacán, junio de 2018

ÍNDICE

RESUMEN.....	10
1 ANTECEDENTES.....	14
1.1 Antecedentes históricos.....	14
1.2 ANTECEDENTES SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA.....	16
1.3 Estructuras construidas con madera.....	18
2 MARCO TEÓRICO.....	22
2.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA MADERA.....	23
2.1.1 Normas de clasificación de la madera y métodos de preservación.....	24
2.1.2 Defectos naturales:.....	26
2.2 Propiedades físicas de la madera.....	28
2.3 Propiedades mecánicas de la madera estructural.....	30
2.4 Caracterización estructural.....	31
2.5 Módulo de elasticidad (MOE):.....	33
2.6 Resistencia a la flexión estática.....	35
2.7 Resistencia a la tracción.....	37
2.7.1 Tracción paralela a la fibra.....	37
2.7.2 Tracción perpendicular a la fibra.....	37
2.8 Resistencia al cizallamiento o cortante.....	38
2.9 Compresión paralela a la fibra.....	39
2.9.1 Compresión perpendicular a la fibra.....	39
2.10 Teoría de la adhesión.....	40
2.10.1 Factores que influyen en la adhesión.....	42
2.10.2 Presión.....	43
2.10.3 Temperatura.....	43
2.10.4 Clasificación de los adhesivos.....	44
2.10.5 Clasificación según su durabilidad.....	44
2.11 TIPO DE UNIONES.....	45
2.11.1 Uniones apernadas.....	45
2.11.2 Uniones encoladas.....	45
2.11.3 Uniones clavadas.....	46
2.11.4 Unión sin tornillo estructuras reciprocas.....	46

2.11.5	Espaciamientos mínimos.....	47
2.11.6	Cargas paralelas a la dirección del grano.....	47
2.12	Descripción arquitectónica de diseño.....	50
3	JUSTIFICACIÓN.....	53
4	HIPÓTESIS.....	54
5	OBJETIVO GENERAL.....	54
5.1.1	Objetivos específicos.....	54
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	55
6.1	Obtención de la madera.....	55
6.1.1	Material preliminar.....	56
6.2	Material compuesto (viga laminada).....	57
6.2.1	Características de los aceros empleados.....	60
6.2.2	Pegamento.....	61
6.2.3	Diseño de conectores.....	62
7	METODOLOGÍA.....	64
7.1	Etapa 1.....	66
7.2	Etapa 2.....	68
7.3	Etapa 3.....	72
8	RESULTADOS.....	74
8.1	ETAPA 1.....	74
8.2	Diseño de elementos de madera.....	75
8.3	ETAPA 2.....	76
8.3.1	Tratamiento 1 T-a (madera solida 2 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)...	77
8.3.2	Tratamiento 2 T-b (madera solida 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)...	80
8.3.3	Variable T 3-c (madera compuesta 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)..	81
8.3.4	T-2 Grafica de deformación unitaria.....	82
8.3.5	Tratamiento 4 T4-d (madera compuesta 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud).....	84
8.3.6	T4-d Graficas de deformación unitaria.....	87
9	Análisis de varianza.....	89
9.1	Variable de densidad.....	89
9.2	Variable de módulo de ruptura (MOR).....	92
9.3	ETAPA 3.....	96

9.3.1 Diseño de piezas sólidas y combinadas.....	96
10CONCLUSIONES.....	102
10.1Probetas con clave T4-d.....	103
11RECOMENDACIONES.....	105
11.1Etapa 2.....	106
12REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
13ANEXOS.....	117
13.1Tratamiento 1.....	118
13.1.1 Tratamiento 2.....	119
13.2Tratamiento 4.....	120
13.3Grupo 2.....	121
13.3.1 Tratamiento 1.....	121
13.3.2 Etapa 2.....	121
13.3.3 Diseños de elementos de madera.....	122
13.4Prototipos elaborados.....	122
13.4.1 Descripción de elementos.....	123
13.5Regresión lineal.....	125
13.6Microscopio electrónico de barrido.....	138
13.7Microscopia óptica y electrónica de barrido.....	140
13.8Metodología para la extracción de fibras (traqueidas).....	141
13.9Índices de fibra.....	143
13.10Descripción anatómica de la madera de <i>Pinus pseudostrobus</i> L.....	144
13.10.1 Características organolépticas.....	144
13.11Descripción macroscópica y microscópica.....	145
13.12Cortes histológicos.....	147
13.13Disociado.....	147
13.14Microscopio electrónico de barrido MEB.....	150
Muestra 3T150	
13.15copolímero de etileno-tetrafluoroetileno (etfe).....	153
13.15.1 Principales ventajas:.....	154
13.16análisis físico- geográfico.....	155
13.16.1 Localización y ubicación.....	155
13.16.2 Vientos dominantes y temperatura de la ciudad de Morelia.....	156

13.16.3	Soleamiento para la ciudad de Morelia.....	156
13.16.4	Temperatura en Morelia.....	158
13.16.5	Precipitación pluvial en la ciudad de Morelia.....	159

Índice de figuras

Figura 1	Plaza de la encarnación en España (Mayer, 2013)	19
Figura 2	Pabellón de Chile en Milán (Dinamo, 2015).	19
Figura 3	Porticullis house (Hopkins, 20.....	20
Figura 4	Características que afectan la resistencia mecánica de la madera:	24
Figura 5	Bandas de parénquima (Calvache, 2008)	26
Figura 6	Medición de la inclinación del grado.....	27
Figura 7	Tipos de nudo: Esquema de los Principales Tipos de Nudos en la Madera;	27
Figura 8	Bolsa de resina en la madera (Chan, et al. 1984).....	28
Figura 9	Flexión de una viga simplemente apoyada (Berumen, 2010).....	31
Figura 10	Grafica de esfuerzo y deformación, límite de proporcionalidad,	32
Figura 11	Esquema de viga sometida a flexión (Aragua 2003)	35
Figura 12	Esquema de resistencia a la tracción (Aragua, 2003).	37
Figura 13	Esquema de cizallamiento (Anon., s.f.)	39
Figura 14	Esquema de la unión adhesiva	40
Figura 15	Diferencia entre adhesión y cohesión	41
Figura 16	Modos de fallos de la unión adhesiva: a) Fallo de adhesivo,	42
Figura 17	Microscopia electrónica (Iawa, 1999).....	50
Figura 18	Obtención de la materia prima en aserradero de Hichaqueo.	55
Figura 19	Muestras de la etapa 1, a) T1 con solera, b) T2 . con malla galvanizada, c) T3 . con malla metálica y d) T4 . madera-madera.	56
Figura 20	Lámina galvanizada.	56
Figura 21	Solera galvanizada.	56
Figura 22	Esquema de los cuatro tratamientos de estudio.	57
Figura 23	Variantes de las piezas estructurales 1) T-a pieza de madera maciza (testigo),	58
Figura 24	T-a: madera maciza 2 x 4 x 35 cm, T-b: madera maciza 4 x 4 x 35 cm.....	59
Figura 25	Malla galvanizada.	60
Figura 26	Malla galvanizada con aberturas en forma de rombo.	60
Figura 27	Resina epoxica y catalizador marca sayer lack.....	61
Figura 28	pegamento amarillo para madera marca Afix 9500.....	61
Figura 29	Pegamento Titebond III	61
Figura 30	Pieza de madera solida con conector metálico.	62
Figura 31	Conector metálico: a) conector metálico en forma de cruz griega,	63
Figura 32	Esquema general de investigación.	65
Figura 33	Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	67
Figura 34	Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	68

Figura 35 Medidor de humedad precisión de temperatura.....	69
Figura 36 Higrómetro (medidor de humedad) marca extech.	69
Figura 37 a: prensa hidráulica, b: presando de piezas de madera.....	70
Figura 38 a) Esquema de prueba mecánica, b) Prueba mecánica, fractura ensayo a flexión.....	71
Figura 39 Equipo utilizado: a) Vernier b) Micrómetro de precisión de 0.01 mm., c) Maquina universal Forney, d) bascula marca L-EQ con capacidad de 10kg/max.....	71
Figura 40 Diagrama de flujo de metodología experimental.....	72
Figura 41 Esquema de prueba mecánica.	73
Figura 42 Muestras de la etapa 1, T-1 con solera, b) T-2 con malla galvanizada,.....	75
Figura 43 a) pieza de madera compuesta con malla galvanizada,.....	75
Figura 44 a: ángulo de anillos de crecimiento, b: prueba mecánica a flexión	78
Figura 45 a) grafico de la deformación unitaria para T-6-a,	79
Figura 46 a) grafico de la deformación unitaria para T-4-a ,b) pieza de madera solida	79
Figura 47 a) Grafico de la deformación unitaria para T-4-a,	80
Figura 48 probetas estructurales de madera de Pinus pseudostrobus L.	81
Figura 49 a) grafico de la deformación unitaria para T-6-b,	82
Figura 50 a) grafico de la deformación unitaria para T-1-b, b) pieza de madera sólida.....	83
Figura 51 a) grafico de la deformación unitaria para T-4-b, b) pieza de madera solida	84
Figura 52 Pieza de madera compuesta clave Tb-25-d.....	85
Figura 53 Pieza de madera compuesta clave T4-30-d.....	85
Figura 54 Pieza de madera compuesta clave T4-31- d.....	86
Figura 55 Pieza de madera compuesta clave T4-32-d.....	86
Figura 56 a) Grafico de la deformación unitaria para T4-6-d, b) pieza compuesta con madera y malla metálica.	87
Figura 57 a) Grafico de la deformación unitaria para T4-8-d, b).....	88
Figura 58 a) Grafico de la deformación unitaria para T4-4-d, b) pieza compuesta con madera y malla..	89
Figura 59 diagrama de cajas y bigotes de la variable de densidad.....	90
Figura 60 a) Tb-a var.1, b) Tb-b var.2, c) Tb-c var. 3 y Tb-d var. 4.....	91
Figura 61 1) pieza solida Tb-a, 2) pieza compuesta Tb-c y 3) pieza compuesta Tb-d.....	91
Figura 62 1) Pieza solida Tb-b, 2) pieza compuesta Tb-c y 3) pieza compuesta Tb	91
Figura 63 diagrama de caja y bigotes de la varianza del MOR.....	92
Figura 64 a) T1-a, b) T2-b, c) T3-c y T4-d.	93
Figura 65 1) Pieza solida T1-a, 2) pieza solida T2-b	94
Figura 66 1) Pieza solida T1-a, 2) pieza compuesta T3-c y 3) pieza compuesta T4-d.	94
Figura 67 a) Pieza estructural de madera maciza armadas con conector metálico,	97
Figura 68 Ensamble de las retículas de piezas solidas de madera con conector metálico.	97
Figura 69 Tipos de falla en flexión estática: a) Falla de tensión simple, b) falla de tensión en sentido del hilo (fibras), c) falla de tensión astillada.	99
Figura 70 Pruebas relacionadas a flexión estática con conector metálico.	99
Figura 71 Pruebas relacionadas a flexión estática con conector metálico.	100
Figura 72 Diagrama de cajas y bigotes para la variable de carga en piezas con conector.	101
Figura 73 probetas de madera con clave TB-d ensayadas en la maquina universal	103
Figura 74 propuesta para continuar con el número de capas	106
Figura 75 a) pieza de madera compuesta con solera en ensayo mecánico,.....	119

Figura 76 a) pieza de madera compuesta con alma de lámina galvanizada,	120
Figura 77 a) piezas de madera solida pegadas con resina epoxica,.....	120
Figura 78 a) pieza de madera compuesta con solera metálica,	121
Figura 79 Pieza de madera solida con cuatro saques	121
Figura 80 Pieza de madera solida con cuatro orificios.....	122
Figura 81 Sección de piezas	122
Figura 82 Cubierta de madera auto soportante utilizando como base un geométrico cuadrado:	123
Figura 83 Cubierta de madera con grapas de galvanizado utilizando como base geométrico un hexágono:	124
Figura 84 Relación entre la densidad y el MOR para 35 cuerpos de prueba.	125
Figura 85 Relación entre número y número de anillos de crecimiento	125
Figura 86 Relación entre MOR y número de anillos de crecimiento	126
Figura 87 regresión lineal entre carga (kg) y tiempo (s)	126
Figura 88 Relación entre el módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión.....	127
Figura 89 Regresión de modulo elástico y densidad.	127
Figura 90 Regresión lineal de módulo de elasticidad y numero de anillos de crecimiento.	128
Figura 91 Regresión lineal de MOR y densidad	128
Figura 92 Regresión lineal de número anillos crecimiento y densidad.....	129
Figura 93 Regresión lineal MOR y numero de anillos de crecimiento	129
Figura 94 Regresión lineal carga y tiempo (s)	130
Figura 95 Relación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión.	130
Figura 96 Regresión lineal densidad y MOE	131
Figura 97 a) Regresión lineal MOE y numero de anillos de crecimiento, b) Probeta TB-12-b.....	131
Figura 98 Regresión lineal MOR y densidad	132
Figura 99 Regresión lineal número anillos de crecimiento y densidad.....	132
Figura 100 Regresión lineal carga (kg/cm ²) y tiempo (s).....	133
Figura 101 regresión lineal de MOR y MOE	133
Figura 102 Regresión lineal del MOE y número de anillos de crecimiento.	134
Figura 103 regresión lineal MOE y densidad.....	134
Figura 104 Regresión lineal entre densidad y el MOR	135
Figura 105 Regresión lineal entre densidad y anillos de crecimiento	135
Figura 106 Regresión lineal el MOR y el número de anillos de crecimiento	136
Figura 107 Regresión lineal tiempo y carga.....	136
Figura 108 Regresión lineal el MOR y el MOE.....	137
Figura 109 Regresión lineal de la densidad y el MOE.....	137
Figura 110 Microscopio electrónico	Figura 111 Esquema de MEB.....
Figura 112 a) Obtención de astillas, b) preparación de los solventes, c) mezcla astillas con solventes y d) concentración de astillas.....	141
Figura 113 a), b) Astillas sometidas al ablandamiento en baño maría hasta lograr su disociación,	142
Figura 114 Tablillas de madera de pino	145
Figura 115 Sección transversal vista a 20 X, mostrando zonación,.....	145
Figura 116 Cortes transversales vistos a 100X, mostrando forma de las traqueidas en madera temprana	146

Figura 119 Corte transversal a): corte transversal a 20x, parénquima radial, madera temprana y tardía.	147
Figura 120 Material disociado a), b) puntuaciones areoladas, pared celular, lumen en sentido longitudinal,	148
Figura 121 Imágenes del MEB de la estructura anatómica a) análisis de muestra en sentido de las manecillas del reloj, b) corte tangencial, 800x esc. 100 µm, c) corte tangencial 200x esc. 100 µm, d) ampliación corte tangencial 600 x a 40 µm, e,f) puntuaciones simples en campo de curce madera tardía, madera temprana, parénquima radial a 200x esc. 100 µm.	150
Figura 122 Imágenes del MEB de la estructura anatómica a) Análisis de muestra en sentido de las manecillas del reloj	151
Figura 123 Configuración de los paneles de ET	154
Figura 124 Ubicación geográfica del estado de Michoacán.	155
Figura 125 Direcciones de los vientos durante todo el año en Morelia Michoacán	156
Figura 126 Grafica solar de Morelia adquirida de la Universidad de Oregón.	156
Figura 127 grafica de solemiento	158

Índice de cuadros

Tabla 1 Especificación y tolerancia para CCA. (NMX-C178ONNCCE-2001)	25
Tabla 2 Características del material compuesto	59
Tabla 3 Características de los elementos de resistencia.	63
Tabla 4 valores mecánicos de la pieza ensayadas mecánicamente.	76
Tabla 5 Valores de densidad de T1-A	77
Tabla 6 Valores de densidad T 2-b	80
Tabla 9 valores de densidad T 3-c	81
Tabla 10 valores de densidad T4-d	84
Tabla 11 análisis de varianza de densidad	90
Tabla 14 análisis de varianza del MOR.	92
Tabla 17 Características del material.	96
Tabla 18 ficha de costos de la pieza de madera con conector	98
Cuadro 2 Análisis de contexto	117
Tabla 16 características de las cubiertas	122
Tabla 20 Nomenclatura de índices de fibra y clasificación de índices de rigidez.	143
Tabla 21 Características organolépticas.	144
Tabla 22 Porcentajes de lúmenes.	152
Tabla 23 tabla de porcentajes de humedad en equilibrio	153
Tabla 24 Temperatura y precipitaciones	159
Tabla 25 Precipitación p	159

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	33
Ecuación 2.....	34
Ecuación 3.....	34

RESUMEN

Se realizaron ensayos de flexión estática según la norma ASTM D-198-99, determinando los esfuerzos de 140 piezas de madera de *Pinus pseudostrobus* L. de procedencia mexicana, 70 de ellas en madera maciza y 70 en madera compuesta, con la finalidad de implementarlas como elementos estructurales en cubiertas de madera para espacios libres en edificios y un segundo uso la aplicación de vigas laminadas en las diversas construcciones coloniales como en la restauración, estructura de retablos, en la viguería de bóveda franciscana, y piezas estructurales de madera en general.

El diseño de experimento consta de cuatro tratamientos de análisis, para el primer caso se ensayaron las probetas de madera maciza con las dimensiones establecidas de acuerdo con el diseño estructural; posteriormente se adhieren dos laminas con pegamento comercial titebond III sometidas a presión con una prensa hidráulica, y por último se añade una lámina completa de madera combinando el metal como alma para estudiar el comportamiento con material completamente homogéneo.

Se hace un análisis anatómico para proceder a la identificación de la especie y entender cómo afecta estructuralmente desde la parte microscópica.

Palabras claves: madera compuesta, laminado, ensayos de flexión, anatomía, cubierta de madera.

ABSTRACT

Tests of static bending according to the standard ASTM D-198-99, were performed by determining the efforts of 140 pieces of wood of *Pinus pseudostrobus* L. 70 of them in solid wood and 70 in composite wood, in order to deploy them in to spaces in buildings wooden decks as a second application the application of laminated beams in various colonial buildings and restoration, structure of altarpieces in the rafters of Franciscan vault, and structural parts of wood in general.

The design of experiment consists of four treatments of analysis, for the first case solid wood specimens assayed with the dimensions laid down in accordance with the structural design; subsequently two attach layers with commercial glue, titebond III subjected to pressure with a hydraulic press, and finally added a full sheet of wood by

combining as soul metal as alma to study the behavior completely homogeneous material.

An anatomic analysis was made to proceed with the identification of the species and understand how affects structurally from the microscopic perspective.

Key words: composite wood, laminated, bending, Anatomy, wood deck trials.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta investigación fue proponer una alternativa de solución en patios de edificaciones históricas y modernas empleando estructuras de madera. Este material alberga la propiedad de no ser contaminante con el medio, por su método de fabricación comparado con materiales como el acero que al ser elaborado sus índices de contaminantes son altos, siendo que la madera después de ser labrada sigue desprendiendo CO₂, el cual hace que trabaje como ser vivo antes, durante y después de ser aserrada.

En el estudio se determinó la flexión estática de las piezas compuestas de *Pinus pseudostrobus* L. especie mexicana de la zona de Michoacán, para evaluar sus características y la proyección del uso futuro de las variantes analizadas en los sistemas estructurales de madera y en el uso de la construcción en general.

La resistencia de la madera depende desde su estructura anatómica, el tipo y función de cada una de las células, como la dirección y acomodo de las fibras, longitud y diámetro, esto lo determinara la especie y desde el crecimiento del árbol.

Se consideró que la madera funciona mecánicamente como un sólido elástico y macroscópicamente homogéneo que obedece a las leyes de la resistencia de materiales y dentro de ciertos límites de calidad y variabilidad, puede considerarse como un material confiable en el área de la construcción.

Para mejorar las propiedades de la madera se elaboraron elementos combinados para lograr piezas con propiedades estructurales y una aplicación general para cualquier tipo de edificios sea al interior o exterior y sus diferentes cargas de soporte.

La orientación de las fibras que componen la madera da lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que a la hora de definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales utilizados en estructuras como el acero y el hormigón.

La madera como material se ha realizado muchos estudios e investigaciones mediante ensayos sobre probetas pequeñas libres de defectos o madera limpia, pero la madera estructural comprende piezas de grandes dimensiones en las que aparecen numerosos defectos como nudos, gemas, etc. Por eso, la tendencia actual es la de estudiar e investigar piezas de madera comerciales o reales que permiten evaluar mejor la presencia e influencia de dichas particularidades.

En los productos estructurales de madera es importante tener en cuenta que han sido clasificados para su uso estructural, y por lo tanto no se pueden utilizar o buscar correlaciones con otro tipo de clasificaciones; por ejemplo, en la madera aserrada no se pueden utilizar o correlacionar las clasificaciones decorativas con las estructurales o utilizar los valores obtenidos con probetas pequeñas.

1 ANTECEDENTES

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La madera se ha utilizado siglos atrás para la construcción de estructuras; grandes civilizaciones como la babilónica y la egipcia presentaban una diversificación de los usos que le daban a la madera en sus construcciones, mobiliario, sarcófagos, objetos de ornamentación, etc. Siglos después los usos prevalecieron en las catedrales góticas fungiendo como estructuras en las techumbres, andamios, pero también en su interior como elementos de ornamentación y mobiliario.

Más tarde, en el Renacimiento, se usaba la estructura de madera en puentes por medio del principio de triangulación, muy utilizado en esta época por las características de resistencia, elaborados con vigas o arcadas sobre caballetes de pilotes de madera inspirados en las ideas de Andrea Palladio, arquitecto italiano de la Republica de Venecia (Tomé, 2010).

Uno de los ejemplos de uso de estas estructuras es la iglesia de transformación en Kizhi Rusia del siglo XVIII, es una de las construcciones de madera más altas del mundo. Alcanza los 37 metros de altura y cuenta con 22 cúpulas encastradas y un impresionante iconostasio (retablo), fue construido sin utilizarse un solo clavo (UNESCO, s.f.). En estas obras las uniones eran hechas mediante pijas de maderas duras de tal manera que dieran la rigidez para cada una de las partes de la estructura diseñada.

La tendencia siguió preponderando en el diseño arquitectónico siendo hasta la Revolución Industrial todos los cambios de la sociedad agrícola e industrializada modifica el empleo de la madera. Desde la industrialización, la madera aserrada fue perdiendo terreno como material constructivo, conforme fue aumentando el uso de materiales tecnológicos como el concreto, el vidrio, acero y aluminio.

En la arquitectura contemporánea, podemos ver varios modelos de construcciones que emplean madera con una nueva reinterpretación, en ellos se han diseñado diversas propuestas de cubiertas curvas de madera, gracias a las aportaciones científicas y tecnológicas es posible pensar en formas que antes eran difícil de concebir por los constructores.

La gran diversidad de software con los que se cuenta en la actualidad permite realizar propuestas más complejas e interesantes en el ámbito del diseño estructural.

En países como Alemania, España, Canadá y el sur de América existen ejemplos de esta tendencia a reinterpretar la madera como un elemento constructivo y de diseño; convirtiéndose así en un elemento fundamental en las edificaciones actuales debido a sus propiedades físico-mecánicas que ofrece en los espacios arquitectónicos (Echenique, 1991).

Las primeras investigaciones sobre el comportamiento de vigas o miembros en flexión fueron realizadas por Leonardo da Vinci en el siglo XV. A principio del siglo XVII, Galileo trabajó en el estudio de los esfuerzos producidos por las cargas verticales en una viga en voladizo. Pero sólo dos siglos después, Navier formuló las ecuaciones de la flexión simple (Dann, 2010).

A pesar de que se han desarrollado a lo largo del tiempo varias teorías más complejas con base en las investigaciones efectuadas sobre el pandeo lateral y pandeo lateral por flexo- torsión las de Navier, su teoría sobre vigas es aún vigente para el diseño de miembros en flexión o vigas. Algunos resultados no han sido aún incorporados en los métodos de diseño modernos (Namoc, 2006).

En México, se sigue usando la madera en estructuras de forma tradicional y no es posible encontrar ejemplos significativos de estructuras en este nuevo estilo de utilización de dicho material, se le considera que el clima es parte de este cambio de aplicación de la madera estructural, entre otros factores económicos y tecnológicos a los que no se les ha dado importancia para el manejo e impulso de ya mencionado recurso.

1.2 ANTECEDENTES SOBRE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

A continuación, se hace mención de algunos artículos revisados que se relacionan directamente con el trabajo de investigación.

Sotomayor (2008) en su tabla de clasificación de características mecánicas de madera mexicanas, reporta para la especie de *Pinus pseudostrobus* L. un módulo de ruptura (MOR) de 585 kg/cm^2 y un módulo de elasticidad (MOE) de 1340000 kg/cm^2 con una densidad de 540 kg/m^3 .

Téllez et.al. (2009) hace un estudio de la madera de *Andira inermis* relacionando la anatomía con el comportamiento mecánicos respecto a esta especie. Se hace un análisis sobre resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides*).

Villaseñor (2000) estudia las dimensiones de las fibras de la especie *Casuarina equisetifolia* para la pulpa y papel relacionando con la longitud de la fibra, el diámetro de fibra, diámetro de lúmenes y grosor de pared celular.

Baño (2017) genera un prototipo de puente vehicular a partir del desarrollo de productos de ingeniería de madera, elabora vigas laminadas dado que no existe normativa que regule la fabricación de estos productos estructurales, adaptados a las condiciones locales; se realizaron ensayos de flexión sobre las vigas encoladas con adhesivo resorcinol.

Barricuelo (1983) afirma que la densidad básica de la madera se encuentra fuertemente relacionada con el grosor de pared de la fibra, diámetro de lumen y longitud de fibra, teniendo efecto en la calidad de la pulpa.

Igartua et.al. (2000), realizaron el estudio de la estructura de la madera de *Eucalyptus globulus* en la provincia de Buenos Aires, Argentina, analizando la variación axial y radial de la densidad básica y la longitud de la fibra de diez árboles de aproximadamente 40 años, encontraron magnitudes y patrones de variación axial y radial de la densidad básica acordes a los mencionados en general para la especie, del mismo modo para la longitud de la fibra en la cual no se observó una importante

variación en el sentido axial. La longitud de fibras registró un valor promedio de 863.79 μm (+/- 320.1) con un rango entre 773.68 μm (+/-181.3) y 907.32 μm (+/- 168.2).

Zavala (2008) estudió un modelado de armaduras de madera por el método de los elementos finitos creando una armadura con un techo de ochos aguas optimizando el desempeño estructural debido a la forma aerodinámica por diseño. Creó cuadrantes geométricos en todo el espacio para repartir cargas uniformemente distribuidas gracias a este método pudo calcular con exactitud los esfuerzos de cortante y el módulo de elasticidad.

Ciencias Naturales e Ingenierías. Comportamiento en flexión estática de vigas de madera antigua de *Picea abies*. Javier Ramón Sotomayor-Castellanos. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. E-mail:madera999@yahoo.com. Recepción: 29-11-2013. Aceptación: 21-10-2014

En el Laboratorio Nacional de Productos Forestales de la Universidad de Los Andes Mérida, Venezuela (2007) se realizaron los ensayos de flexión estática, según la Norma ASTM D- 198-84, para la determinación de los esfuerzos de diseño de 18 vigas de madera laminada de pino caribe encoladas con adhesivo de isocianato (MDI) (Contreras, 2007).

Estas vigas laminadas se dividieron en dos tipos, 9 estaban constituidas por láminas completas de madera y las otras 9 estaban constituidas por láminas de madera seccionadas y unidas por medio de la técnica del finger joint; dentro de cada uno de estos tipos se prepararon tres vigas laminadas con anchos distintos (65 mm, 95 mm y 125 mm), siendo sus alturas y sus largos iguales (270 mm y 3500 mm respectivamente).

En el Laboratorio Nacional de Productos Forestales de la Universidad de Los Andes Mérida, Venezuela (2007). Al ellos comparar los resultados obtenidos con valores de vigas laminadas de pino radiata de Chile, y pino resinoso de Argentina se logró determinar, que los valores de Esfuerzo Límite Proporcional, Módulo de Ruptura y Módulo de Elasticidad para todas las vigas estudiadas estaban por debajo.

El análisis morfológico de todas las vigas definió que éstas presentaron grandes deficiencias en la calidad física de la madera y las líneas de cola, y por igual, en el proceso de fabricación. Estos factores, son la principal causa de los bajos valores obtenidos. Se recomienda, en esta primera etapa de la industria, mejorar los aspectos técnicos señalados, para aumentar la resistencia y calidad estructural de las vigas laminadas encoladas.

1.3 ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS CON MADERA

La madera laminada tuvo origen en Europa para el año de 1906 por la existencia de madera con defectos naturales donde son capas de madera compactadas a presión y pueden ser de diversos diámetros, longitudes y formas para cubrir grandes claros (Etherington., 2010).

Barroso (s.f.) muestra un ejemplo es Centro George Pompidou Metz diseñado por los arquitectos Shigeru Ban, Jean-de Gastines y Felipe Gumuchdjian, situado en esta localidad francesa que es puerta de entrada a Luxemburgo, Alemania y Bélgica. La basta estructura modular es básicamente una gran cubierta ondulada realizada totalmente en madera, debajo de la cual se cobijan, interceptan y emergen otros cuerpos geométricos de la edificación que parecen perforarla.

Otro ejemplo es el Metropol Parasol del proyectista alemán Jürgen Mayer (2013) propuesta ganadora de medalla de bronce que se buscaba proyectos que contribuyen a un futuro sostenible y que mejora la calidad de vida a través de materiales como la madera.

Con una superficie de 150 x 70 metros una altura aproximada de 26 metros, y fue el proyecto ganador del concurso abierto por el Ayuntamiento de Sevilla para llevar a cabo la rehabilitación de la plaza de la Encarnación (Mayer 2013).

Esta edificación es construida a base de concreto armado, madera sólida, madera micro laminado y acero. El sistema estructural de madera y acero fue unido con resina de poliuretano de alto rendimiento.



Figura 1 Plaza de la encarnación en España (Mayer, 2013)

La madera micro laminada Kerto, está compuesta por láminas de abeto *Pseudotsuga menziesii* de 3 mm de espesor obtenidas por desenrollado y encoladas para formar grandes paneles que logran una elevada resistencia mecánica. Las piezas de madera que componen esta estructura expuesta fueron revestidas con una piel impermeable de poliuretano de entre 2 y 3 mm, que protege de la intemperie, pero a la vez es permeable al vapor.

Las uniones en las intersecciones de las numerosas piezas fueron realizadas mediante barras de acero encoladas, de fácil optimización para un rápido montaje en obra.

Otro de los arquitectos es el proyectista chileno Cristian Undurraga con su proyecto ganador el Pabellón de Chile en un concurso de sustentabilidad en Milán; en estos dos proyectos se denota la preocupación por el medio natural y se ve reflejada en la mayoría de sus obras (Dinamo, 2015) fig. 15.



Figura 2 Pabellón de Chile en Milán (Dinamo, 2015).

Para esta obra se usó madera laminada como el material que construye y caracteriza el Pabellón, por su valor sensorial y tectónico, es un recurso renovable y valioso en la cadena medioambiental. Por otra parte, la madera laminada, es un material industrializado lo que permite una calidad homogénea y un adecuado control técnico (Cabezas, 2013).

Otro proyecto importante en la implementación de este tipo de estructuras es Portcullis House (2016) se encuentra situado en Bridge Street, Westminster. Se trata de un edificio de planta rectangular con un patio central de 25 x 50 m aproximadamente, bajo una cubierta de vidrio fig. 16.



Figura 3 Portcullis house (Hopkins, 2016)

Los arquitectos Hopkins (2016), definieron la forma de la cubierta como un arco rebajado constituido por una malla geodésica de madera. El objetivo era crear una estructura de cubierta muy ligera con la máxima transparencia, si fuera posible utilizando roble blanco estadounidense por su color y textura.

Era inevitable una asignación de valores conservadores de resistencia que daría lugar a piezas de grandes escuadrías, aunque los datos publicados sobre el resultado de ensayos realizados a piezas de pequeña escuadría en realidad mostraban valores más altos para el roble europeo, y el material disponible de la calidad primera y segunda (FAS) sería de muy alta calidad, con fibra recta y pocos nudos (Hopkins, 2016).

Esta alta resistencia permitió fabricar el entramado básico con piezas dobles de madera laminada de roble de sólo 100 x 200 mm de sección. Los extremos de cada pieza se unen mediante pernos a una placa metálica, a su vez conectada a una esfera de acero, todo en acero inoxidable. La zona plana perimetral de la cubierta, cuyo acceso se encuentra permitido para el mantenimiento, se soporta sobre grupos de columnas ahusadas torneadas a partir de una pieza de madera laminada de roble blanco estadounidense. Los paneles de vidrio se apoyan en una estructura diagonal secundaria formada por varillas atirantadas (Council, 2006).

Para este tipo de estructuras es imposible que se piense solamente en la estructura de madera en su totalidad porque no daría la resistencia adecuada que se busca ya que con ayuda de conectores metálicos puedes lograr la forma y resistencia que se pretende alcanzar.

2 MARCOTEÓRICO

Los pinos (División: Gimnosperma) son un grupo de plantas vasculares con semilla de origen muy diverso, estas plantas presentan óvulos expuestos en hojas modificadas (megasporófilas) (Martines, 1948).

Aunque el número de coníferas es muy bajo comparándolo con el de las plantas con flor (División: Angiospermas), su valor económico las convierte en un grupo muy conocido e importante. México cuenta con poco más de 91 especies conocidas de las 575 coníferas que existen en el mundo y pertenecen a cinco familias: Cipreses (*Cupressaceae* 32 especies), Pinos, Abetos y Hayarines (*Pinaceae* 54 especies), Podocarpos (*Podocarpaceae* 3 especies), Ahuehuete (*Taxodiaceae* 1 especie) y el Tejo (*Taxaceae* 1 especie) (Biodiversidad, 2017).

Son considerados como el primer género de árboles en distribución y área, o constituyen el componente dominante de los bosques de coníferas del país en conjunto con los encinos, y estos habitan de manera natural por arriba de los 800 metros sobre el nivel del mar. Es decir, están presentes en serranías, elevaciones y en general en los sistemas montañosos del país y rodeadas de desiertos de donde han sido excluidos. Algunas pocas especies habitan altitudes menores como el pino caribeño (Biodiversidad, 2017).

Las coníferas mexicanas representan el sustento de toda la industria forestal. De ellas se extraen muchos productos desde la madera, resina, astillas, postes, acículas, conos, semillas. Su madera se emplea para construcción de muebles, casas, postes, durmientes, cajas de empaque, contrachapas, instrumentos musicales, artesanías y como combustible (Johnston, 1983).

De manera general, de las coníferas se obtienen productos forestales como madera, pulpa para elaboración de papel, productos químicos como resinas, barnices, trementinas, etcétera. Los pinos revisten gran importancia debido a que prácticamente todas las especies de pino son utilizadas para elaborar maderas aserradas (Biodiversidad, 2017).

2.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA MADERA

Descripción macroscópica. Madera de color amarillento, sin diferencia entre albura y duramen; de olor resinoso, suave y de textura fina a mediana, peso ligero y la zona de transición entre madera de primavera y verano es abrupta. Brillo bajo a mediano; vetado mediano a pronunciado, dado por los anillos de crecimiento y por los canales resiníferos; su hilo es recto. Las bandas de la madera de verano son angostas de color café pálido; canales resiníferos localizados en la parte exterior del anillo de crecimiento son abundantes (De la Paz y Olvera, 1981).

Usos

Esta especie es buena productora de resina, la cual es explotada en los estados del centro y sur de México. La madera es de buena calidad y sus largos fustes limpios permiten el uso en aserrío, madera terciada, chapa, triplay, pulpa para papel, caballetes, molduras, jaulas y envases, como barrera de calor y sonido, postes, pilotes, madera para minas, durmientes para ferrocarril, tejamaniles y largueros, combustibles, palillos y fósforos.

Es muy apreciada en artesanías, ebanistería y muebles finos o de producción seriada, como mesas, butacas, bancos, etc., en las zonas rurales tiene varios usos domésticos. (De la Paz y Olvera, 1981).

Criterio de selección de la madera

Las características que afectan la madera reciben el nombre de irregularidad física, química o fisicoquímica de la madera, que afecte los aspectos de resistencia o durabilidad, determinando generalmente una limitante en su uso o aplicación. Al identificar los defectos de la madera permite clasificarla por aspecto o resistencia.

Para la selección del material se hizo la selección de acuerdo con la **norma NMX-C-239- 1985 “calificación y clasificación visual para madera de pino en usos estructurales”** donde se muestran características que afectan a la madera dividiéndola en la clasificación por defectos de madera y secado y por factores que influyen su resistencia como se ve en fig. 1 (NMX-C-239-1985).

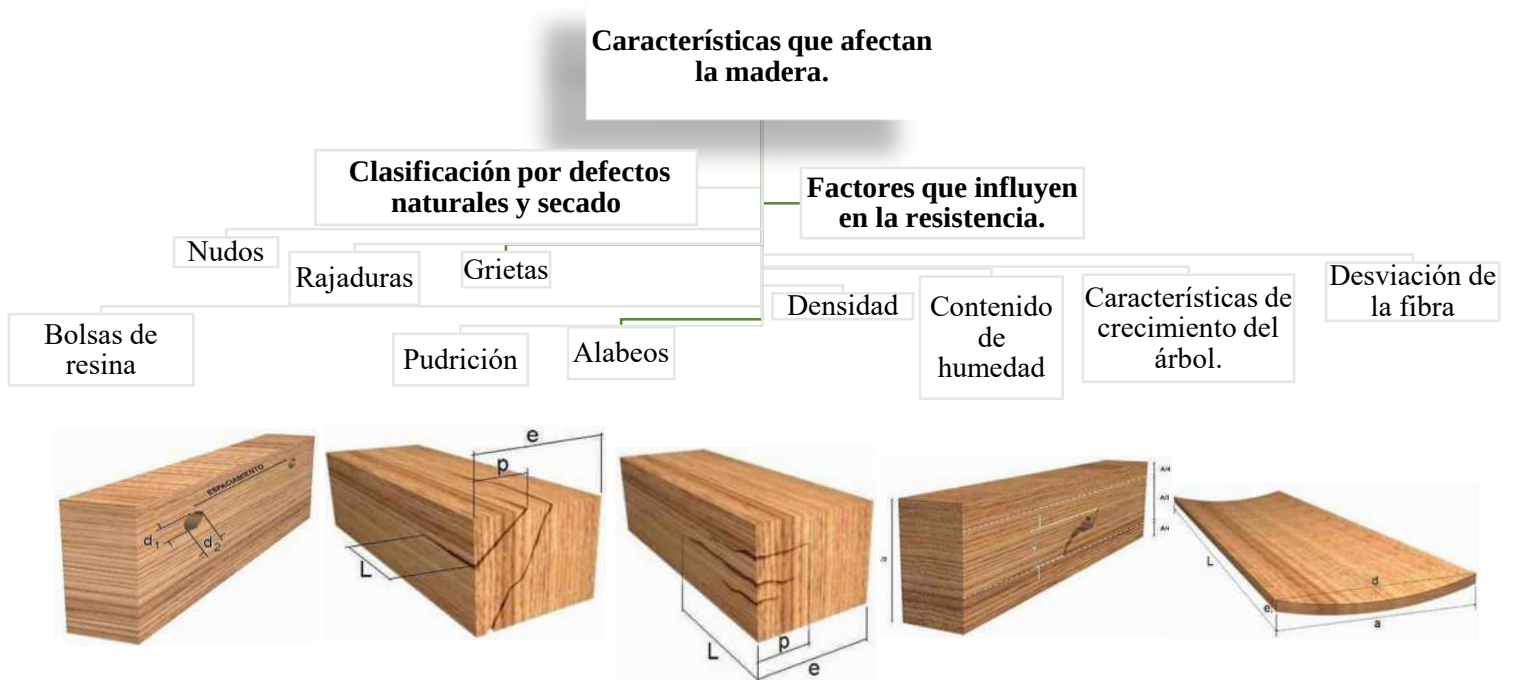


Figura 4 Características que afectan la resistencia mecánica de la madera: Nudos sueltos, b) Rajaduras, c) grietas, d) bolsa de resina y e) alabeos (Chan, 2002).

2.1.1 Normas de clasificación de la madera y métodos de preservación

En las normas técnicas de construcción NTC para diseño y construcción de estructuras de madera en el apartado 7 de ejecución de obras menciona que la madera empleada con fines estructurales debe estar libre de cualquier agente biológico como son los hongos o insectos lo cual no se admitirá madera en pudrición en ningún estado.

En cuanto a la calidad de la madera se regirá por la **norma NMX-C-239-1985 “calificación y clasificación visual para madera de pino en usos estructurales”** esta norma establece los criterios a seguir para dimensionar la madera seca y cepillada destinada a la construcción de estructuras. La madera de pino se clasifica en tres clases de acuerdo con su resistencia (NMX-C-239-1985).

Clase A.- alta resistencia, apta para uso estructural de sección de 19-140 mm de grosor y 87-29 mm de ancho.

1. Clase B.- media resistencia, apta para uso estructural de sección de 19-140 mm de grosor.
2. Clase C.- baja resistencia, no apta para usos estructural.
 - PA: madera de alta resistencia con secciones de 87 x 87 mm.
 - PB: madera de baja resistencia con secciones de 87 x 87 mm.
 - VA: madera de alta resistencia con secciones de 87 x 190 mm.
 - VB: madera de baja resistencia con secciones de 87 x 190.

La NTC establece que el contenido de humedad de la madera debe ser menor al 18% por lo que debe secarse a un contenido de humedad apropiado en equilibrio de acuerdo con la zona o región donde se implementen las piezas estructurales.

La protección de la madera se hará contra cambios de humedad, hongos e insectos. Los preservantes deben cumplir con la norma NMX-C178ONNCCE-2001 “**preservación para madera- clasificación y requisitos**”, la cual establece especificaciones que deben cumplir los preservadores empleados en madera de usos estructural. Dentro de la clase 1 se encuentran las solubles en agua y en la subclase 5 se encuentra el arsenato de cobre cromado (CCA) Ver tabla 1, (NMX-C178ONNCCE-2001).

Tabla 1 Especificación y tolerancia para CCA. (NMX-C178ONNCCE-2001)

Preservador CCA	Nominal en %	Mínimo en %	Máximo en %
Cobre, como CuO	18.5	17	21
Cromo hexavalente, CrO₃	47.5	44.5	50
Arsénico AsO₅	34	30	38

La norma NMX-C-322-ONNCCE-2003, **madera preservada a presión clasificación y requisitos (2003)**, en el caso de la madera tratada a presión. En esta última se establecen las clases de riesgo, sus características y el tratamiento adecuado de acuerdo con la vida útil, toda madera tratada debe ser pintada para protegerla de los efectos causados por el sol.

En el caso de las sales CCA para el riego R₃, en donde la estructura está expuesta a posibles fuentes de humedad o a la intemperie, la retención mínima recomendada es de un 9.6 kg/cm².

A continuación, se hace mención de cómo se debe hacer una selección de las piezas de madera, considerando factores libres de ciertos defectos naturales, al momento de ser secada o aserrada que se ve reflejado en su resistencia mecánica.

Chan, et al. (1984), en su artículo titulado “Los defectos naturales en la madera aserrada”, señalan que la mayoría de los investigadores han clasificado los defectos de la madera en las siguientes clases:

1. Defectos naturales u originados por la constitución anatómica de la especie.
2. Defectos originados por ataques biológicos.
3. Defectos originados durante el secado.

2.1.2 Defectos naturales:

Los defectos que presenta la madera tienen su origen cuando el árbol está en pleno proceso de desarrollo.

Bandas anchas de parénquima

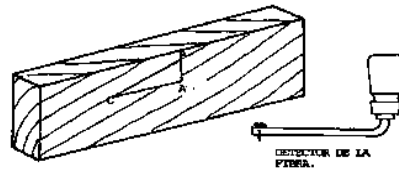
Chan, et. al (1984) “Son zonas conformadas por células de parénquima, distribuidas en bandas continuas de variado espesor. Dichas células sirven para almacenar sustancias de reserva, razón por la cual son susceptibles al ataque de hongos e insectos cuando la madera presenta un alto contenido de humedad” fig. 2.



Figura 5 Bandas de parénquima (Calvache, 2008)

Grano entrecruzado

“Es la disposición del grano debido a un crecimiento de las fibras en forma de espiral con respecto al eje del árbol, alternándose la dirección de la espiral en capas de diverso espesor. La desviación del grano afecta considerablemente el comportamiento mecánico de las piezas de madera debido a su naturaleza anisótropa. Por ejemplo, una desviación de $1/20$ puede reducir el módulo de ruptura en 7% y el módulo de elasticidad en un 4%. Si la desviación es de $1/5$, las reducciones respectivas son del 45% y el 33%” fig. 3



(Chan, et al. 1984) fig. 3.

Figura 6 Medición de la inclinación del grano.

Nudos.

“**Nudo sano.** Es la porción de rama interconectada con el resto de la madera que no se soltará o aflojará durante los procesos de secado y uso. Este tipo de nudo se forma cuando las ramas están vivas y son envueltas por el material del tronco (Chan, et al. 1984).

Nudo muerto. Este tipo de nudo se forma cuando una rama muere y queda un muñón que acaba rodeado por los tejidos del tronco. En este caso no existe continuidad entre los tejidos del nudo y los del tronco y debido a ello los nudos muertos se desprenden con facilidad fig. 4” (Chan, et al. (1984).

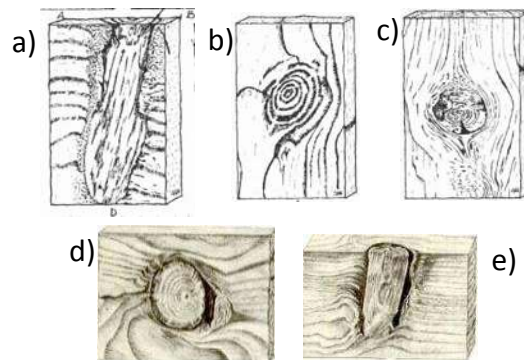
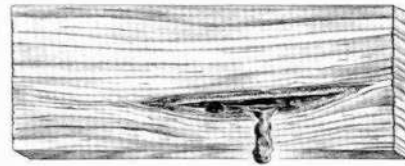


Figura 7 Tipos de nudo: Esquema de los Principales Tipos de Nudos en la Madera;
(a) Nudo fijo, Nudo flojo, (d) Nudo en forma de perno,
(e) Nudo en forma de perno mostrando la porción fija y floja. (Chan, et al. (1984).

Bolsas de resina

“Son cavidades entre los estratos que se componen los anillos de crecimiento. Sus efectos sobre la resistencia mecánica dependen de su abundancia, tamaño y localización en las piezas de madera (Chan, et al. 1984).

Por esto las bolsas de resina cerca o en el plano neutro de piezas de madera sujetas a flexión, tienden a reducir el área disponible para resistir las fuerzas cortantes



horizontales fig. 5”.

Figura 8 Bolsa de resina en la madera (Chan, et al. 1984).

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química.

Densidad

Fernández (1991) nos dice que la densidad de la madera se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad, generalmente el 12 %. Según su densidad se pueden clasificar en: muy ligera, ligera, semipesado, pesada, muy pesada.

La densidad es una variable importante para determinar la resistencia de la madera. Esta depende de varios factores, entre los cuales se puede mencionar:

- › Composición de las paredes celulares
- › Grosor de las paredes celulares
- › Tamaño de las porosidades
- › Composición de la celulosa (Ordóñez, 1985).

Como bien se ha mencionado la madera es un material vivo y natural que tiene grandes ventajas como es la flexibilidad que presenta comparado con algún otro material de construcción, esto por las diversas propiedades que presenta, existen ejemplos significativos sobre la aplicación de estas estructuras.

Material Anisotrópico

La madera no es una materia de estructura homogénea y uniforme. Se encuentra formada por un conjunto de células alargadas de diferente longitud que cumplen funciones tales como la conducción de la savia (alimento del árbol), transformación y almacenamiento de sustancias nutrientes o bien la sustentación física (Hoadley, 2000).

Higroscopicidad

La madera es un material higroscópico que tiende a absorber o perder agua según las condiciones del ambiente (humedad relativa y temperatura del aire). De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico (Fernández, 1991).

La higroscopicidad de la madera se mide como la variación de la densidad de esta cuando su contenido de humedad varía en un 1 por 100. La madera deberá tener la humedad correspondiente a la humedad de equilibrio higroscópico. De esta manera se reducen los movimientos que podrían ocasionarse a causa de la variación de su grado de humedad (Kollmann, 1999).

Material Ortotrópico

Un material es ortotrópico cuando sus propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares entre sí. la madera es en ejemplo de material ortotrópico (Kollmann, 1999).

Contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera, “Ch”, se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de la masa anhidra. En la fórmula se observa que el numerador representa la masa de agua que tiene la madera.

$$Ch = (Ph - P0) \times 100 / P0$$

Ecuación 1. Contenido de Humedad

Siendo: Ph = peso húmedo de la probeta. P0 = peso anhidro de la probeta, (obtenido por desecación en estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C.) La variación del contenido de humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Debido a su anisotropía, las variaciones dimensionales no serán las mismas en las direcciones axial, radial y tangencial (Kollmann, 1999).

Dónde: p = densidad, m = masa y v = volumen. Despejando la formula anterior tenemos:

$$v = m / p \quad \text{Ecuación 2. Obtención de volumen}$$

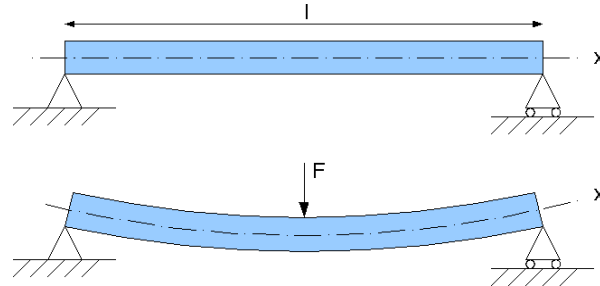
$$m = p * v \quad \text{Ecuación 3. Obtención de la masa.}$$

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA ESTRUCTURAL.

Las propiedades más importantes para la clasificación por resistencia son la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad en flexión y la densidad, las cuales son determinadas directa o indirectamente en el proceso de caracterización mecánica de una madera. En la actualidad, para la realización de los ensayos se emplean probetas de tamaño estructural usual, representativas de la calidad y dimensiones del material empleado en las construcciones (Barajas, 1981).

El sistema más utilizado en el país para la caracterización de madera aserrada es el basado en la clasificación visual y posterior asignación de las piezas a clases resistentes. Consiste en la inspección visual evaluando las singularidades que aparecen en cada una de las piezas. La madera se considera ortotropico por las diferentes formas o direcciones que tiene como la axial, tangencial y longitudinal (Ordóñez, 1985).

La propiedad mecánica determina la resistencia de la madera a ser deformada por la aplicación de una fuerza externa, la dirección y el tipo de esfuerzos influyen en su resistencia dependiendo de la especie el comportamiento será variable. La madera a



flexión resiste tensión paralela y perpendicular (Ambrose, 1998) fig.6.

Figura 9 Flexión de una viga simplemente apoyada (Berumen, 2010).

2.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Para estar a este nivel de exigencia y competir con el mercado internacional es fundamental realizar un análisis estructural haciendo una serie de ensayos y cálculos que determinen el estado de la estructura para confirmar que tan viable es el diseño que se propone, pero sobre todo la dimensión de la pieza de madera y la especie con la que se está planteando, así mismo el comportamiento mecánico en cada una de las piezas de acuerdo con el diseño de la cubierta propuesta (COFAN, 1999).

- › Se consultaron las normas ASTM D-143-94 "Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber" (Métodos estandarizados para el muestreo de pequeños especímenes de manera libre de defectos) (Smith, 2006).
- › La norma ASTM D3737-12 la define como “un material (de ingeniería) compuesto de piezas de madera seleccionadas, adheridas y preparadas para formar elementos estructurales de forma recta o curva y con la dirección de la fibra de la madera orientada paralelamente al eje longitudinal de los componentes.” (ASTM, 2012)

Las propiedades mecánicas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas externas; su comportamiento mecánico está relacionado con el crecimiento y desarrollo del árbol; esto puede variar de acuerdo con la especie.

El esfuerzo que soporta un cuerpo por unidad de superficie es la llamada tensión unitaria. Cuando la carga aplicada a un cuerpo aumenta, se produce una deformación que se incrementa paulatinamente. Esta relación entre la carga aplicada y la deformación que sufre un cuerpo se puede representar gráficamente por una recta, hasta el punto donde se inicia el límite elástico del material ensayado fig. 10. Si se sigue aumentando la carga, se logra la fractura del material (Parker, 1991). El límite elástico se define como el esfuerzo por unidad de superficie, en que la deformación aumenta en mayor proporción que la carga que se aplica.

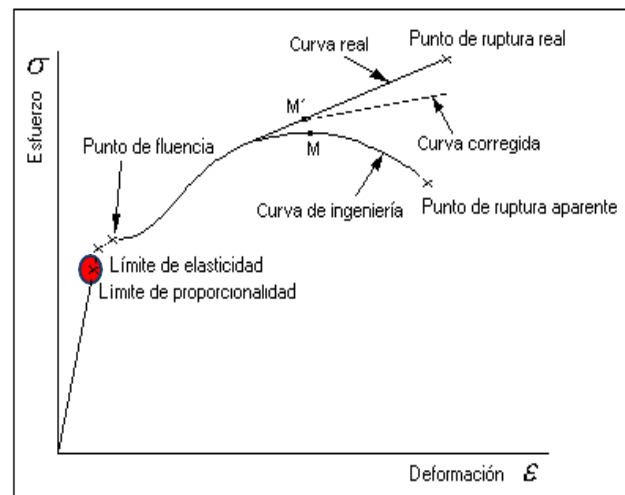


Figura 10 Grafica de esfuerzo y deformación, límite de proporcionalidad, Límite de elasticidad, punto de fluencia, punto de ruptura.

El esfuerzo necesario para solicitar un material hasta el límite elástico determina la tensión en el límite de proporcionalidad, que es la carga máxima a que se puede someter sin que se produzcan deformaciones permanentes (Parker, 2007).

La rigidez de un cuerpo se define como la propiedad que tiene para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas. La medida de rigidez de la madera se conoce como coeficiente de elasticidad, calculado por la razón entre esfuerzo por unidad de superficie y deformación por unidad de longitud (Handbook, 2010).

Cuando la carga resulta mayor a la del límite elástico, la pieza continúa deformándose hasta llegar a colapsar, obteniendo la tensión de rotura de la pieza de madera (Ambrose, 1998).

Para determinar las propiedades elásticas y mecánicas en las direcciones principales de la madera, usualmente se realizan ensayos de compresión en pequeñas probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y transversal, y libres de particularidades de crecimiento, tales como nudos y/o desviación de la fibra (Sotomayor, 2014).

La resistencia de la madera se realiza en columnas cortas para determinar la tensión de rotura, tensión en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad. La fuerza que realiza la madera contra tensiones que tienden a aplastarla. El efecto de aplastamiento es mayor con las fibras de sentido perpendicular, que en sentido contrario son dos fuerzas en sentido contrario que serán para cortarla, se considera como de los mejores índices para saber el comportamiento mecánico de una madera. (Herrero, 2003).

2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD (MOE):

Propiedad de la madera que puede curvarse longitudinalmente sin romperse. En la madera existen dos módulos de elasticidad, en las fibras en sentido paralelo: el módulo de elasticidad a la tracción, y el módulo de elasticidad a la compresión; la resistencia ante dichas fuerzas adquiere valores diferentes. Para calcularlo, se tienen en cuenta los anteriores valores de tracción y compresión (Espinoza, 2016).

En la madera, debido a su anisotropía, el módulo de elasticidad en dirección paralela a la fibra adopta valores diferentes según se trate de sollicitaciones de compresión o de tracción. En la práctica se utiliza un único valor del módulo de elasticidad para la dirección paralela a la fibra. Su valor varía entre 7000 y 12000 N/mm² dependiendo de la calidad de la madera. En la dirección perpendicular a la fibra se toma análogamente, un único módulo de elasticidad, cuyo valor es 30 veces inferior al paralelo a la fibra. Para calcular el módulo de elasticidad de la madera se hace uso de la ecuación 2.

Donde:

MOE: Modulo de elasticidad

AF: Cualquier diferencia de fuerza

Ad: Deformación ocurrido en el intervalo F

L: longitud donde fue medido la deformación.

MOE

$$= \frac{AF \times L}{\Delta d \times a \times b}$$

Ecuación 1

Formula de resistencia en módulo de ruptura o compresión.

Donde:

MOR: resistencia o módulo de ruptura en flexión.

M: momento de flexión

W: momento resistente

F: fuerza máxima de ruptura o fuerza límite.

LS: distancia de soportes

a: ancho de la probeta

e: altura de a probeta

$$MOR: \frac{M}{W}$$

200 F x LS

Ecuación 2

Módulo de elasticidad por flexión

Donde:

MOE: módulo de elasticidad por flexión.

AF: diferencia de fuerza del campo elástico

AD: deformación en el intervalo F.

Ls: distancia de soportes

a: ancho de la probeta

e: altura de a probeta

$$MOE: \frac{AF \times Ls^3}{4 \times a \times e^3 \times AD}$$

Ecuación 3

2.6 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA

Es la resistencia de la viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz determinando la tensión en el límite de proporcionalidad tensión de rotura y es la fuerza que hace la madera contra las tensiones de compresión y tracción de las fibras en paralelo fig. 11 (Guzmán, 2003).

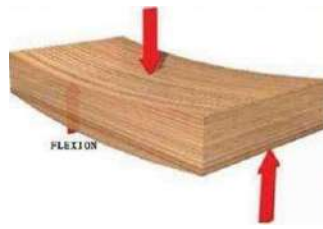


Figura 11 Esquema de viga sometida a flexión (Aragua 2003)

La madera puede estar en distintas posiciones a la hora de enfrentarse a las fuerzas de flexión: entre dos apoyos, sobre dos apoyos o adherida a una pieza. Esta propiedad es muy importante cuando las piezas son largas y finas (estantes, bancos, suelo). La resistencia de la madera a la flexión suele ser muy grande. La flexión es una de las acciones internas más comunes en las estructuras de todo tipo. Generalmente se presenta en las vigas de los sistemas de piso, pero también en las vigas y largueros de pared y de cubierta de edificios industriales (Gúzman, 2003).

Las secciones más apropiadas para resistir flexión son las secciones “I” laminadas. Para vigas sometidas a flexión producida por cargas moderadas se utilizan perfiles estructurales laminados Gerdau Corsa, mientras que para momentos flexionantes de gran magnitud se recurre a miembros armados fabricados con tres placas soldadas y eventualmente al uso de trabes armadas provistas de atiesadores esto para el caso de los aceros (Mayori, 2004).

La Resistencia de Materiales tiene como finalidad el cálculo de los cuerpos sometidos a cargas y los problemas a resolver son de dos tipos:

- a) **Dimensionamiento.** - Cuando se busca seleccionar el material, las formas y dimensiones más adecuadas de una pieza, de manera que ésta pueda trabajar con seguridad, en buen estado y con costos adecuados.
- b) **Verificación.** - Cuando una pieza tiene el material, las formas y dimensiones prefijadas y es necesario conocer si estas son las adecuadas para resistir el estado de solicitaciones actuantes (Mayori, 2004).

2.7 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

2.7.1 Tracción paralela a la fibra

Es la fuerza que realiza la madera ante dos tensiones de sentido contrario que hacen que disminuya la sección transversal y aumente la longitud fig. 12. En la madera clasificada, los valores característicos oscilan entre 8 y 18 N/mm². Como ejemplo de piezas solicitadas a este esfuerzo se encuentran, principalmente, los tirantes y los pendolones de las cerchas. Considérese una barra sometida a la acción de dos fuerzas iguales, opuestas y colineales en sus extremos (Aragua, 2003).

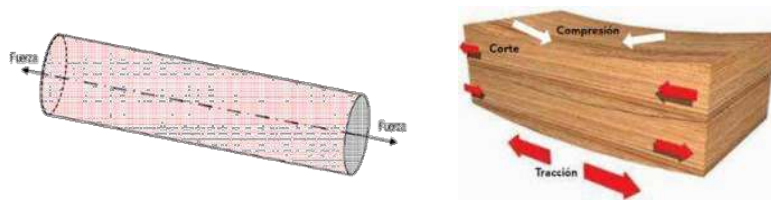


Figura 12 Esquema de resistencia a la tracción (Aragua, 2003).

2.7.2 Tracción perpendicular a la fibra

La tracción perpendicular a la fibra es muy baja (del orden de 30 a 70 veces menos que en la dirección paralela). Su valor característico es de 0.3 a 0.4 N/mm². En la práctica y aplicado a las estructuras, esta sollicitación resulta crítica en piezas especiales de directriz curva (arcos, vigas curvas, etc) o en zonas de cambio brusco de directriz (zonas de vértice). Estas tensiones de tracción, también se pueden producir como consecuencia de la coacción del libre movimiento transversal de la madera en soluciones constructivas incorrectas, que pueden ser evitadas fácilmente con el conocimiento del material (Téllez, 2009).

La madera solamente se reduce cuando el agua se pierde de las paredes celulares y se encoge en una cantidad que es proporcional a la humedad perdida por debajo del punto de saturación de la fibra. Para una primera aproximación, la contracción volumétrica es proporcional al número de moléculas de agua que son adsorbidos dentro de la pared celular, y que a su vez está relacionado con el número de hidroxilos accesibles en las de celulosa, hemicelulosas y lignina.

La contracción axial, radial y tangencial en conjunto, representan la contracción volumétrica, por las características de la estructura de madera que resisten la contracción (Handbook, 2010).

Al igual que otros materiales de construcción, la madera se dilata o contrae al aumentar o disminuir la temperatura; sin embargo, en la mayoría de los elementos estructurales este efecto es de muy pequeña magnitud y las tensiones secundarias generadas por dilatación o contracción resultan despreciables. El efecto de dilatación o contracción debe ser debidamente analizado en aquellos elementos de gran longitud que se encuentran sometidos a grandes cambios de temperatura (Barajas, 1981).

La madera es un material que absorbe o entrega agua, según sean las condiciones de humedad relativa y temperatura del ambiente que la rodea. Mientras el aumento o disminución del contenido de humedad presente dentro de los rangos correspondientes al estado verde, la madera es dimensionalmente estable. Pero en algunas especies se observa una reducción dimensional antes de alcanzar el punto de saturación de la fibra. Este fenómeno se conoce como “colapso” y se debe al aplastamiento de las paredes celulares (Lazcano, 1997).

2.8 RESISTENCIA AL CIZALLAMIENTO O CORTANTE

Parker (2007) determina la resistencia interna al desliz o desplazar una superficie sobre otra contigua, al aplicar dos cargas iguales opuestas y paralelas sobre planos adyacentes. Zonas de fallo de la madera se da en las áreas donde hay presencia de madera tardía o temprana. Aquellos esfuerzos o fuerzas que soporta cada unidad de área cuya dirección es tangencial a la sección transversal se conocen como esfuerzos cortantes. Los esfuerzos de corte no son positivos ni negativos.

En la madera también existe un módulo de cortante ligado a los esfuerzos cortantes. Su valor es 16 veces inferior al módulo de elasticidad paralelo a la fibra. El esfuerzo cortante origina tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos.

Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. El fallo se produce por aplastamiento.

Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por el deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en la dirección longitudinal.

Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de unas fibras sobre las otras (Parker, 2007).

En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento. Sus valores característicos (por deslizamiento) varían entre 1.7 y 3.0 N/mm² en las especies y calidades utilizadas habitualmente en la construcción fig. 13. Las tensiones tangenciales por rodadura de fibras sólo se producen en casos muy concretos, como son las uniones encoladas entre el alma y el ala de una viga con sección en doble T.

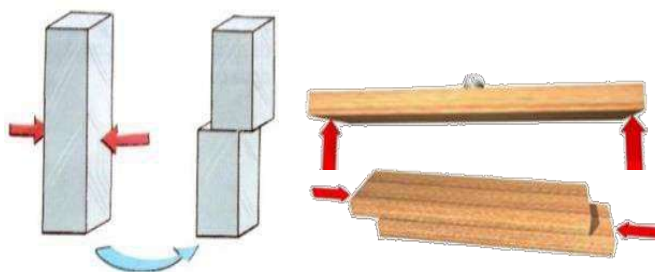


Figura 13 Esquema de cizallamiento (Anon., s.f.)

2.9 COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

Ambrose (1998) nos dice que la resistencia a compresión paralela a la fibra es elevada, alcanzando valores característicos en la madera clasificada de 16 a 23 N/mm². En el cálculo de los elementos comprimidos se ha de realizar la comprobación de la inestabilidad de la pieza (pandeo), en el que influye decisivamente el módulo de elasticidad. El valor relativamente bajo de este módulo reduce en la práctica la resistencia a la compresión en piezas esbeltas.

2.9.1 Compresión perpendicular a la fibra

Su resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la de la dirección paralela. Sus valores característicos varían entre 4.3 y 5.7 N/mm², lo que representa la cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra. (Ambrose, 1998).

2.10 TEORÍA DE LA ADHESIÓN

Toda materia está constituida por átomos y moléculas las que están unidas entre sí por valencias o fuerzas de naturaleza eléctrica. La técnica de la adhesión se basa en este principio y utiliza estas fuerzas para crear una unión entre dos cuerpos sólidos. En elementos no porosos la resistencia de la unión función solo de la fuerza de atracción que tendrán las moléculas de la superficie de los adheridos sobre las del adhesivo. Cuando se trata de madera será, un elemento poroso, existe una penetración del adhesivo mientras éste permanezca en estado líquido (Madrid, s.f.).

“Aparte de esta penetración del adhesivo la unión de madera con adhesivo sigue un comportamiento común a otros elementos, encontrándose dos tipos de fuerzas; aquella con que el adhesivo se adhiere a la superficie, adhesión y la fuerza con que se unen las moléculas del adhesivo entre sí, cohesión.”

El efecto de la penetración del adhesivo en la madera se traduce en la diferenciación de tres zonas; la parte de madera impregnada de adhesivo de uno de los adheridos, la capa de adhesivo y la parte de madera impregnada de adhesivo del otro adherido.

Las uniones adhesivas presentan las siguientes ventajas con respecto a otros métodos de ensamblaje de materiales:

Distribución uniforme de tensiones.

- Rigidización de las uniones.
- No se produce distorsión del sustrato.
- Permiten la unión económica de distintos materiales.
- Uniones selladas.
- Aislamiento.
- Reducción del número de componentes
- Mejora del aspecto del producto.
- Compatibilidad del producto.
- Uniones



Figura 14 Esquema de la unión adhesiva

Como inconvenientes de los adhesivos, podemos destacar:

- Necesidad de preparación superficial.
- Espera de los tiempos de curado.
- Dificultad de desmontaje.
- Resistencias mecánicas.

Inexistencia de ensayos no destructivos (Madrid, s.f.).

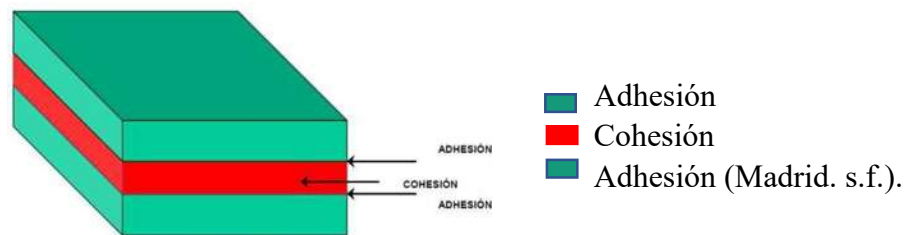


Figura 15 Diferencia entre adhesión y cohesión

En cuanto a las fuerzas desarrolladas y según los conceptos actuales de la teoría de la adhesión, se puede distinguir entre adhesión específica y mecánica. La adhesión específica se refiere a las fuerzas eléctricas de atracción molecular entre el adhesivo y la superficie del adhiriendo cuando el adhesivo se encuentra fraguado.

La adhesión mecánica está dada por la forma de unión entre el adherido y el adhesivo, corresponde a un anclaje mecánico del adhesivo en la madera debido a la penetración.

Una vez fraguado el adhesivo se pueden observar ramificaciones, lo cual ayuda a fortalecer la unión. Sin embargo, se atribuye la principal fuente de resistencia a la adhesión específica. (Jiménez, s.f.)

Es debido a esto que para obtener mejores uniones se debe tratar de lograr altos valores de adhesión específica. Cabe agregar que el encolar superficies ásperas puede mejorar la calidad de la unión; aumentando la adhesión mecánica y por consiguiente lográndose un aumento en la superficie de contacto lo que mejora la adhesión específica.

Por otra parte, las fuerzas de cohesión influyen directamente sobre la resistencia de la capa del adhesivo o indirectamente sobre la adhesión mecánica. Así, con mejor cohesión tendrán ramificaciones más resistentes.

Podemos evaluar la adhesión de dos sustratos simplemente realizando un ensayo de rotura de la unión adhesiva. Así, el fallo de una unión adhesiva puede ocurrir según tres posibles modos:

- Separación por adhesión: cuando la separación se produce en la interfase sustrato-adhesivo.
- Separación por cohesión: cuando se produce la ruptura del adhesivo.
- Ruptura de sustrato: cuando el propio sustrato rompe antes que la unión adhesiva o que la interfase sustrato-adhesivo (Madrid, s.f.).

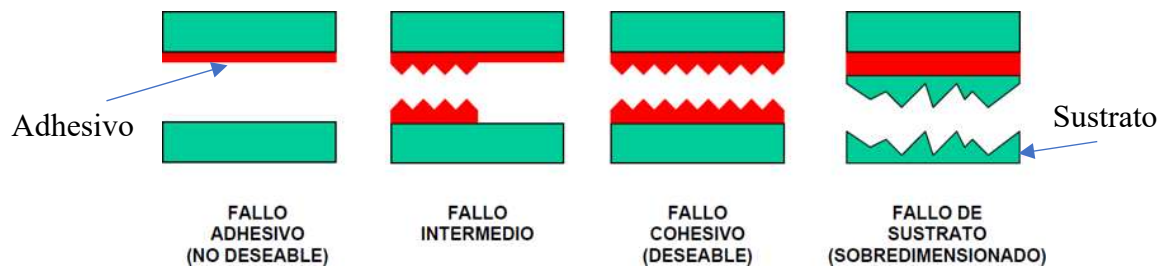


Figura 16 Modos de fallos de la unión adhesiva: a) Fallo de adhesivo, b) fallos intermedio, c) fallo de cohesivo y d) fallos de sustrato (Madrid, s.f.).

2.10.1 Factores que influyen en la adhesión.

Se puede comprobar que a mayor densidad encontramos mayores variaciones volumétricas al cambiar el contenido de humedad, lo que produce tensiones que en el caso de elementos adheridos deben ser soportadas por las juntas. Este efecto sumando a la relación existente entre densidad y volumen de espacio libre se traduce para especies de mayor densidad, las condiciones y factores que influyen en la formación de la unión deberán ser tratados de manera que permitan la obtención de una junta de mayor resistencia que la necesaria en una especie de densidad más baja (Madrid, s.f.).

Cabe agregar que la madera, con humedad sobre el punto de saturación de las fibras, al ser puesta en servicio encontrará su humedad de equilibrio contrayéndose, provocando tensiones que pueden hacer fallar la unión. Por el contrario, al encolar madera con contenidos de humedad demasiado bajos para los requisitos del adhesivo, o bien al encolar madera anhidra también se genera una unión defectuosa causada por uno o la combinación de los fenómenos siguientes:

Absorción exagerada del adhesivo produciéndose un fraguado anticipado de éste. A veces este efecto se ve acompañado por una desaparición de la línea de junta, no constituyéndose la unión o bien formándose una junta muy débil.

Fallas de la adhesión cuando la madera puesta en servicio alcanza su humedad de equilibrio hinchándose.

Al absorber la madera humedad del ambiente, el adhesivo también puede absorber parte de esta humedad cambiando las propiedades que tenía cuando estaba endurecido. (Sika, 2011)

2.10.2 Presión.

La aplicación de presión es en ciertos casos la única condición ajena al adhesivo y a la madera que se utiliza para lograr la unión. Sin embargo, se debe tener presente que con algunos tipos de adhesivos y juntas no se requiere de presión. La producción de una buena junta se puede determinar al observar que por medio de la presión se ha conseguido:

- a) Un completo contacto entre las superficies de los adheridos.
- b) El aire y parte del adhesivo que quedaba en la zona a unir aflora en los bordes de la línea de junta.
- c) Se produce una línea de junta fina, de igual espesor en toda la superficie a unir.

La presión aplicada a los elementos que se desean unir debe permanecer durante gran parte del endurecimiento. En algunos casos el fraguado continúa aún después de prensado. Además, existe la posibilidad de efectuar el prensado en presencia de temperatura.

2.10.3 Temperatura.

Una parte de los adhesivos requiere de temperaturas superiores a las del medio ambiente para lograr una unión de óptimas características. El efecto de aplicar temperaturas se traduce en la disminución de la tensión superficial, lo cual facilita la penetración del adhesivo en la madera. Además, produce una evaporación del medio portador y acelera las reacciones físicoquímicas que conducen al fraguado del adhesivo.

Al utilizar como factores de fraguado la temperatura juntamente con presión tiene una serie de ventajas sobre el utilizar solo presión. Entre ellas se pueden señalar como las más importantes; la reducción del tiempo de prensado y la posibilidad de aplicar una

menor cantidad de adhesivo. Sin embargo, la instalación de estos sistemas requiere de altos costos de inversión, controles muy precisos de la humedad de la madera y una preparación extremadamente cuidadosa de la madera.

2.10.4 Clasificación de los adhesivos.

La clasificación de los diferentes tipos de adhesivos podría llevarse a cabo de acuerdo con un gran número de parámetros como ser: composición química de los constituyentes principales, durabilidad, resistencia, uso, características técnicas y otros. Sin embargo, se hace difícil el ordenarlos ya que la mayoría de estos conceptos están a su vez influenciados por otro tipo de factores tales como humedad de la madera, temperatura, formulaciones del adhesivo y otros. (Sika, 2011)

2.10.5 Clasificación según su durabilidad.

Las normas *British Standard Specifications* nos dicen que los adhesivos se pueden clasificar según su durabilidad. Esta resistencia se puede determinar luego de exposiciones naturales durante algunos años, o bien mediante ensayos de probetas estandarizadas, con inmersiones en agua fría, caliente, hirviendo o en vapor, ordenándolas de acuerdo con su mayor o menor resistencia a estas condiciones.

Se han determinado cuatro clases las cuales se describen a continuación:

- a) Resistentes a la intemperie, microorganismos, agua fría y caliente, vapor y calor seco. En este grupo se encuentran los adhesivos fenólicos y de resorcinol.
- b) Buena resistencia a la intemperie y al agua caliente. Falla ante exposiciones a la intemperie muy prolongada buena resistencia al test de agua fría y resistencia al ataque de microorganismos. A esta clase se pueden incluir adhesivos de melamina y urea fortificada.
- c) Resistencia a la intemperie solo por algunos años. Resisten al agua fría, pero en agua caliente la durabilidad es limitada. Sin resistencia en agua hirviendo. Estas características corresponden a las de urea formaldehído pura o con menos de 25% de carga.
- d) Resistentes al agua fría, pero fallan a la intemperie, agua hirviendo y microorganismos. Se recomiendan solo para interiores. En este grupo encontramos adhesivos de: urea

formaldehído cuando tiene más de un 25% de carga, albumina de sangre caseína, acetato de polivinilo, adhesivos de contacto (Sika, 2011).

2.11 TIPO DE UNIONES

Existen diferentes tipos de uniones en estructuras de madera. Una de las partes más singulares en las estructuras de madera son sus uniones, es un aspecto crítico y complejo que requiere un acertado diseño y una correcta ejecución.

2.11.1 Uniones apernadas

Son uniones desmontables de tipo puntual. El perno constituye uno de los medios de unión más antiguos y usados pese a que la capacidad de transmisión de carga en relación con el consumo de acero es bastante reducida. En el funcionamiento de una unión apernada se producen tres fases distintas en la transmisión de fuerzas:

En un comienzo, y especialmente para pernos fuertemente apretados la unión trabaja por roce. Luego los pernos se ubican contiguos a la madera presionando las paredes de los agujeros. b) Esta presión que inicialmente es uniforme en su distribución sobre la superficie del agujero, con el aumento de la carga se desuniformiza debido al efecto flexor que se produce en el perno, generándose concentraciones localizadas de tensiones en los bordes de la madera.

El perno deformado se incrusta en la madera. c) Finalmente, esta deformación del perno es tal que los corrimientos que ha experimentado la unión superan ampliamente las deformaciones admisibles en uniones estructurales. (Tecnología, s.f.)

2.11.2 Uniones encoladas

Son uniones rígidas de efecto resistente superficial proveniente de acciones mecánicas y químicas. Su rigidez es tal que generalmente falla antes la madera vecina a la unión. Corresponden al medio de unión de maderas más nuevo y se proyecta el de mayores posibilidades para el futuro. Sus principales ventajas se detallan a continuación:

- Posibilitan la ejecución de secciones de piezas no limitas por las del material original. (prefabricación).
- Permiten un consumo económico de la madera (tablas y tablones).
- Neutralizan las fallas naturales de la madera.

- Las uniones endentadas y en bisel permiten la construcción de uniones no visibles originando piezas de considerable longitud.
- Las estructuras encoladas poseen una alta resistencia al fuego, e incluso pueden ser calculadas para este objeto.
- Se materializan sin debilitar las piezas a unir como sucede con los restantes medios de unión.
- Implican economías en el consumo del acero.
- La construcción de estructuras laminado-encoladas permite solucionar óptimamente los requisitos estáticos como arquitectónicos.
- Estas últimas estructuras poseen una excelente resistencia a los ataques químicos. xii) Abren posibilidades de ampliaciones, reparaciones en obra, modificaciones y desmontaje sin grandes dificultades (Tecnología, s.f.).

2.11.3 Uniones clavadas

Por lo general las uniones clavadas son las más económicas, y son muy usadas en especial para viviendas y edificaciones pequeñas construidas en base a entramados. Los clavos se fabrican en un amplio intervalo de tamaños y formas, según el uso que se quiera dar. Varían en tamaño desde las pequeñas tachuelas a gigantescas escarpías. Los clavos se clavan mediante un martillo, sin embargo, para clavar muchos clavos, actualmente se cuenta con una gran variedad de dispositivos mecánicos para clavar.

Todas las especies del grupo estructural C y muchas del grupo B pueden clavarse fácilmente, sobre todo cuando la madera se encuentra en condición verde; las maderas más densas y/o secas son por lo general más difíciles de clavar. Si se clavan maderas del grupo estructural A es conveniente hacer un pre-taladro con un diámetro del orden de 0.8 veces el diámetro del clavo, esto a menos que se usen clavos de alta resistencia, clavados mediante dispositivos mecánicos especiales. Se debe hacer notar que en cualquier unión se debe usar como mínimo al menos 2 clavos. (Sargiotti, 2010)

2.11.4 Unión sin tornillo estructuras reciprocas

El uso de la madera para la construcción en la cultura japonesa es de gran tradición. Muy avanzada y con técnicas milenarias que hoy en día se siguen utilizando. Las estructuras recíprocas se definen como un conjunto de elementos auto-apoyados en circuito cerrado, una definición bastante completa pero difícil de digerir sin un buen

ejemplo gráfico. En la imagen siguiente se muestra la disposición más simple de una estructura recíproca: tres barras que se superponen para apoyarse unas sobre otras y alcanzar un equilibrio estructural sencillo y elegante. (Sargiotti, 2010)

Se han encontrado documentos que atestiguan que en el Japón del siglo XII se usaban técnicas constructivas basadas en este diseño estructural y no son pocos los diferentes ejemplos de edificación que a lo largo de la historia han utilizado disposiciones estructurales basadas en este principio.

2.11.5 Espaciamientos mínimos.

El espaciamiento entre pernos y las distancias entre éstos y los bordes de los elementos de madera deben ser suficientes para permitir que cada perno desarrolle toda su capacidad resistente. En uniones constituidas por elementos de madera orientados en direcciones diferentes, se deben verificar por separado los requisitos de espaciamiento en cada uno de ellos, resultando para la unión los que sean mayores en cada dirección. En lo que sigue, se define como línea de pernos a la que forman dos o más pernos en una línea paralela a la dirección de la carga. (Sargiotti, 2010)

2.11.6 Cargas paralelas a la dirección del grano

Sargiotti (2010) En elementos en los que las fuerzas aplicadas siguen la dirección del grano; la distancia entre pernos, separación de las filas y las distancias a los bordes y extremos deben ser mayores o iguales que las indicadas. Todas estas distancias deben medirse a partir de la cabeza del perno.

Algunas recomendaciones y consideraciones para el correcto diseño de las uniones de madera son:

1. En uniones mecánicas con tornillos, clavos y pernos hay que calcular el correcto diámetro, ya que un diámetro pequeño puede suponer un desplazamiento al transmitir el esfuerzo en una superficie pequeña aplastando las fibras de la madera.
2. Si se usan varios medios de unión como son colas, pernos y clavos, hay que tener en cuenta que la relación de resistencia no es lineal, sino que el medio más rígido será el que primero trabaje. Una unión clavada es más rígida que una unión con perno.

3. Hay que evitar la excentricidad de las uniones, esto quiere decir que la proyección del vector del esfuerzo en la unión debe ser transmitido en el mismo punto evitando varios centros con la posibilidad de generar nuevos esfuerzos y complicar el cálculo.
4. En muchas estructuras se dan inversiones de esfuerzos de manera que al cambiar por ejemplo de un esfuerzo de tracción a compresión repetidas veces se genera una pequeña holgura en la unión debido al aplastamiento en sendas direcciones.
5. A la hora de usar elementos metálicos hay que tener en cuenta los coeficientes de dilatación según la exposición. La madera y el metal se comportan diferentemente frente a la humedad y calor. Mientras que la madera con la humedad aumenta su volumen en especial en la dirección perpendicular a la fibra el metal no se ve afectado, pero en cambio si se ve afectado por la temperatura. Este efecto se ve acentuado con la relación temperatura humedad en el aire, ya que al aumentar la temperatura se disminuye la humedad. Por ello en piezas con de grandes dimensiones se suelen hacer unos pequeños cassetes en el agujero del tornillo o perno en la dirección perpendicular para evitar posibles fendas. (Sargiotti, 2010)

La madera está compuesta de pequeñas unidades estructurales llamadas células. Estas son de forma alargada y su base es la celulosa, las células a su vez están segmentadas por lignina, y su ordenamiento dentro del árbol afecta grandemente la apariencia y las propiedades de las diversas especies (Martinez, 1948).

Siendo un material de origen natural, son bastantes los factores que afectan la resistencia de la madera, como defectos de crecimiento, nudos, inclinación de la fibra, contenido de humedad la mayoría de las propiedades mecánicas aumentan al reducirse la humedad, la temperatura puede afectar la resistencia de la madera, sobre todo si se trata de una exposición prolongada al calor, pero si se trata de una exposición corta la afección será igualmente temporal y regresará a su estado inicial (Martinez, 1948).

Se considera una desventaja al trabajar con madera debido a su procedencia biológica, por tal motivo se piensa al momento en que la madera es sometida a esfuerzos de carga puntual o uniformemente distribuida (Díaz, 1986).

Por tal atribución es fundamental la caracterización técnica del material, así como el desarrollo de productos compuestos de madera para la utilización en la industria de la

construcción. Para este caso las tablas aserradas se clasificaron de acuerdo con los defectos como nudos, desviación de la fibra, rajaduras, torceduras, etc. que se tenían en cada una de las piezas.

La madera por su origen biológico de acuerdo con las caras que se contemple tiene tres ejes: tangencia, longitudinal y radial, estas tres direcciones dan como resultado distintos tipos de resistencia según sea el eje del que se trate; debido a estas características se considera como un material anisotrópico. (Baradit, 2013).

Integración: Se define como la “... aportación de elementos claramente nuevos y visibles para asegurar la conservación del objeto [es decir del monumento]” y consiste en “completar con materiales nuevos o similares, con el propósito de darle estabilidad y/o unidad [visual]a la obra” (Bonilla, 2004).

El **respeto a la historicidad del inmueble** se refiere a que se deben respetar las distintas etapas históricas constructivas del edificio, sus espacios originales, así como las ampliaciones, remodelaciones de importancia, mismas que no impliquen una afectación que vaya en detrimento del bien inmueble.

De acuerdo con Vishwa N.P. Mathur y Eliseo Temprano (1995), en su trabajo publicado “Diseño para servir” para hacer un uso adecuado de la madera mencionan tres reglas principales para obtener el mejor comportamiento de la madera en estructuras: 1) Usar madera seca; 2) mantenerla seca y 3) tratarla con un preservador adecuado cuando la madera pueda estar expuesta al ataque de organismos.

Desde el punto de vista del uso de la madera como material para la construcción, este material se destaca por presentar una excelente relación peso/resistencia debido a la eficiencia estructural de sus células fibrosas y tubulares, lo que lo convierte en un material adecuado y al mismo tiempo muy ligero. No obstante, se debe tener presente que la madera es un material heterogéneo, de comportamiento altamente variable y anisotrópico, las propiedades resistentes serán más variables cuanto más pequeña y delgada resulte la sección de la pieza (Vishwa, 19

2.12 DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA DE DISEÑO

En un espacio se encuentra una combinación de belleza, arte y diseño, más si en esa zona se pasa gran parte del día, no importa cuál sea el lugar por inercia se busca las mismas características a donde se vaya haciendo un recuerdo imborrable de la vivencia obtenida durante la visita y más si el lugar transmitió al usuario la calidez, seguridad y tranquilidad durante su estancia.

Desde la parte arquitectónica vista de la formalidad, el entendimiento del lugar como es medir espacialmente contemplando el contexto en el cual se le dará vida íntegramente.

La pieza estructural se inspira en la ramificación de la madera que se puede observar microscópicamente, para dar la resistencia, rigidez y flexibilidad; estando constituida la madera en su interior por pequeñas unidades estructurales llamadas células, son de forma alargada y su base es la celulosa, están cementadas por lignina, y su ordenamiento dentro del árbol afecta enormemente la apariencia y las propiedades de las diversas especies.

Al momento de diseñar una cubierta con posibles soluciones estructurales será la conexión entre el intervalo microscópico que alberga la madera y el mundo macroscópico el cual puede percibirse a simple vista.

Se hace una analogía inspirada en una célula microscópica de la madera abstrayendo la estructura que forman los miles de células, donde las intersecciones de la cubierta de madera que se propone estarán entrelazadas formando la red estructural, al igual que la orientación de las fibras que se observan en los diferentes cortes típicos de la madera como es el axial, tangencial y transversal fig. 17.

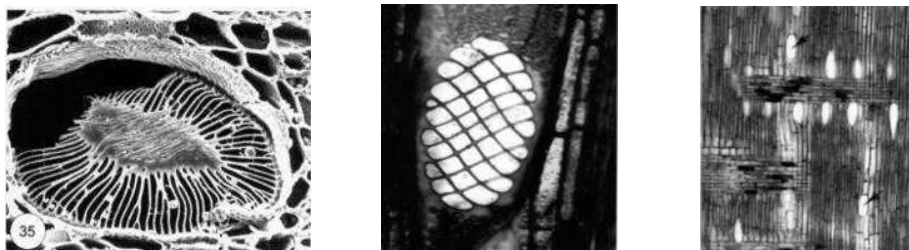


Figura 17 Microscopia electrónica (Iawa, 1999)

Para llevar a cabo una realización de la primera aproximación al concepto, se debe tomar la fenomenología del lugar y el contexto como es la relación e integración en este caso de la cubierta de madera y el edificio, al igual que las construcciones que lo circundan, por lo tanto, la arquitectura debe ser sinuosa, discreta, pero que haga sentir esa tranquilidad que se percibe al estar en contacto con la naturaleza.

El diseño debe estar basado en la simetría y geometría por el tipo de diseño y en el sistema modular implementado por primera vez por el arquitecto Le Corbusier en 1950 donde este sistema tenía que ser antropométrico, matemático y armónico por lo tanto tenía que estar basado en las medietades del hombre, siendo el modular un sistema armónico de medidas y no de cifras como se pensaba, haciendo un uso exhaustivo de la sección aurea y de las series de Fibonacci (Torres, 2017).

El uso de estructura de madera sólida o compuestas en cubiertas es una instalación que surge a partir de la exploración de un material como es la madera y el acero donde su manipulación y la forma en que se configura el espacio arquitectónico cuenta de una coherencia entre hacer y producir. Una estructura ligera, frágil y sinuosa, que permite tamizar la luz otorgando sombra y abrigo al espacio interior de la edificación colonial. Posado en una estructura de pilares y vigas de madera.

Un material, al convertirse en un proyecto de arquitectura, debe considerar una suma de componentes que conforman sus elementos constructivos, los cuales dan lugar a espacios con una geometría determinada. La arquitectura como una práctica material y los procesos como una aproximación a la obra, una objetividad basada en la materia que tiene que ver con aquello que tanto la materia como la arquitectura comparten (Dann, 2010).

El proyecto opera desde el detalle, de la construcción a partir de fragmentos, que es la relación entre el todo y sus partes. Estos elementos adquieren significados en su totalidad, pero también entre sí mismos. La arquitectura es un arte porque se interesa no sólo en la necesidad original de refugiarse sino también en generar espacios y materiales de modo significativo.

El detalle fértil, es el lugar en el que se dan la construcción semántica y material de la arquitectura”. Debido a sus dimensiones permite un mejor control sobre las acciones a las que son sometidas las placas de maderas, y que, a la vez en su conjunto, otorga una mayor porosidad para el traspaso de la luz, el viento y la lluvia.

La forma es ejecutada a partir de diversos prototipos basados en la aparente monotonía y repetición constante de una pieza. Colocando énfasis en la relación entre el todo y no en la suma directa de sus partes. La obra tiene el potencial de crear su propio lugar y definir su propia situación. Al momento de emplazarse en un contexto ya existente se debe generar una lectura completa del lugar, ver las relaciones que se generan en términos de contenido.

Los diseños de las cubiertas están basados en la simetría y geometría y en el sistema modular implementado por primera vez por el arquitecto le Corbusier en 1950 donde este sistema tenía que ser antropométrico, matemático y armónico, siendo el modular un sistema armónico de medidas y no de cifras como se pensaba, haciendo un uso exhaustivo de la sección aurea y de las series de Fibonacci (Torres, 2017).

La cubierta de madera es una instalación que surge a partir de la exploración de un material como es la madera y el acero donde su manipulación y la forma en que se configura el espacio arquitectónico dan cuenta de una coherencia entre hacer y producir. Una estructura ligera, frágil y sinuoso, que permite tamizar la luz otorgando sombra y abrigo al espacio interior de la edificación.

3 JUSTIFICACIÓN

El proyecto de investigación se enfocó en la realización de piezas estructurales por medio de un alma de acero adheridas con pegamento Titebond 111, a gran medida las estructuras se han aplicado en gran parte de edificaciones hechas con acero y vidrio por mencionar alguno de los casos.

La implementación de las piezas sólidas y compuestas en cubiertas de estructuras de madera en patios de edificios y áreas urbanas se ha llevado a cabo en ciudades europeas en los últimos años con el objetivo de aprovechar el espacio que se encuentra al interior y exterior de las edificaciones. Estas estructuras están constituidas con un diseño a base de formas geométricas que se integran al espacio y contexto.

Las secciones y longitudes que se usaron en el diseño de las estructuras son menores a las secciones que se encuentra en el mercado que se utilizan actualmente en las cubiertas de diseño de viguería tradicional.

Por lo tanto, al utilizar las cortas dimensiones el costo de estas estructuras disminuye gradualmente; teniendo como principales ventajas, menos defectos como nudos, menos probabilidad de torceduras o alabeos, disminución de rajaduras debido a un mejor control en el secado, facilidad de utilizar elementos preservantes y facilidad en el manejo, transportación e instalación.

En México encontramos pocos ejemplos del uso de este tipo de piezas estructurales de madera en edificaciones, por lo tanto, este proyecto plantea dar una solución con este material noble como es la madera donde se integre al edificio generando un diseño que se constituya una iniciativa destinada a difundir las posibilidades que la madera ofrece para estructuras orgánicas y paramétricas (ver tabla 3).

4 HIPÓTESIS

Las piezas de madera (sólida y compuesta) de cortas dimensiones pueden ser utilizadas para el diseño y construcción de estructuras de madera para grandes claros.

5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y evaluar piezas de madera sólida y compuestas de cortas dimensiones a partir de la madera de *Pinus pseudostrobus* L.

5.1.1 Objetivos específicos

- Determinar el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en flexión estática en probetas de madera maciza y en la combinación de madera-metal-madera.
- Determinar el módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR) en flexión estática en probetas de madera maciza y en la combinación de madera-metal-madera
- Determinar el MOR en módulos armados con las piezas de madera y los conectores metálicos
- Elaborar módulos armados con piezas de madrea y conectores metálicos.

6 MATERIALES Y MÉTODOS.

6.1 OBTENCIÓN DE LA MADERA

En Michoacán, existen plantaciones de diferentes especies maderables a lo largo de la Sierra Madre del sur, donde se encuentran especies como *Pinus pseudostrobus* L. siendo de gran interés por la Comisión Nacional Forestal CONAFOR por sus propiedades resinosas. La obtención de la madera para las muestras de laboratorio fue proporcionada en el municipio de Hichaqueo Michoacán, por el aserradero Hichaqueo dedicadas a productos forestales con un plan de manejo forestal fig. 18.

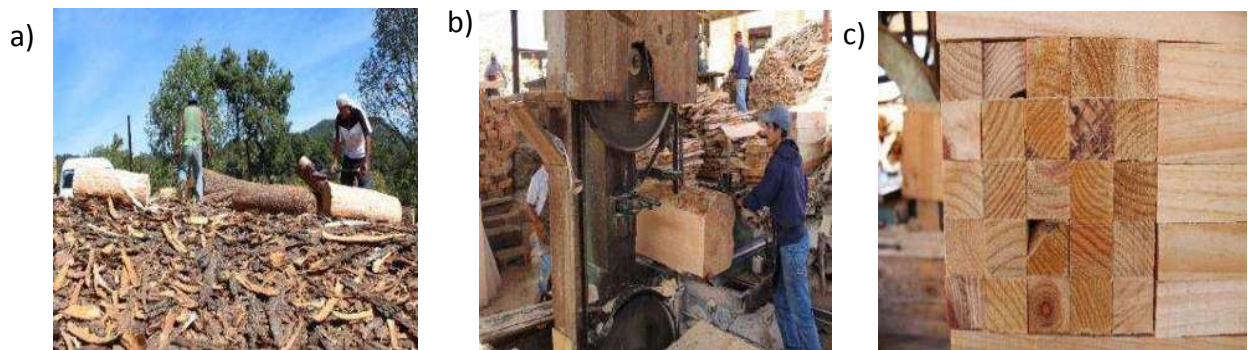


Figura 18 Obtención de la materia prima en aserradero de Hichaqueo.

a) Troza de pino, b) corte con sierra, c) probetas de madera.

La madera se seleccionó de acuerdo con la norma como se describe anteriormente en el apartado de criterio de selección de la madera. El material fue obtenido en tablas de medida comercial 1" x 12" 8" las cuales fueron cepilladas y canteadas en el laboratorio de maquinado de la madera de FITECMA. La madera se secó al exterior bajo techo, por un periodo de 4 meses para evitar el agrietamiento en las piezas y los cambios dimensionales causados por los cambios drásticos de temperatura, así como la deformación evitando defectos comunes como es el alabeo.

Después se acondiciono al 12% en una cámara de secado donde las piezas fueron apiladas de madera de tal manera quedando espacios vacíos entre las mismas. El tamaño de las muestras fue determinado basándose en las normas ASTM para flexión libre de defectos considerando el grosor de las piezas de las tablas obtenidas.

La forma de las piezas es rectangular simulando una viga de madera. Posteriormente se marcaron y fueron cortadas a las dimensiones requeridas para formar las probetas para cada tratamiento.

6.1.1 Material preliminar

Se probaron dimensiones en longitud de 67.5 cm con una sección de 2.5 x 3.5 cm y se consideró el criterio de soportar 300 kg para cada una de las piezas en estos datos solo se quería comprobar la efectividad de los metales usados y pegamentos fig. 19.



Figura 19 Muestras de la etapa 1, a) **T1** con solera, b) **T2**. con malla galvanizada, c) **T3**. con malla metálica y d) **T4**. madera-madera.

Para la preparación de las probetas se llevaron a cabo dos grupos, el primero de 4 tratamientos con diferentes almas metálicas, se implementó lámina galvanizada calibre 24, con un espesor de 0.57 mm y una longitud de 66.5 para el grupo uno y 69 cm de longitud para el grupo dos fig. 20.



Figura 20 Lámina galvanizada.

En este tercer metal implementado se hizo uso de una solera de 1 cm de ancho por 3 mm de grosor y una longitud de 66.5 para el grupo uno y 69 cm de longitud para el grupo dos fig. 21.



Figura 21 Solera galvanizada.

6.2 MATERIAL COMPUESTO (VIGA LAMINADA)

Para la segunda etapa el criterio de selección del material fue que estuviera libre de defectos como nudos, bolsas de resinas, la dirección de la fibra, rajaduras, alabeos en las piezas de madera, pudriciones, hongos, número y ángulo de anillos de crecimiento, las piezas obtenidas fueron con dimensiones comerciales de 6", 10" y 10", 8 ¼" en estado seco al aire libre.

Se realizaron listones de viga maciza para cada caso, para las pruebas se fueron añadiendo láminas y se introdujo alma de acero en malla galvanizada para aumentar la posibilidad de resistencia que se tiene en la pieza. La sección determinada para estos grupos son piezas de 2 x 5 cm con una longitud de 35 cm tomando un criterio de diseño inicial de 300 kg a 500 kg para cada pieza compuesta.

Se realizó un análisis de las variables densidad, MOR, MOE, anillos de crecimiento, carga respecto a tiempo, correlaciones, análisis de Anova y pruebas de Tukey.

Las probetas de madera fueron codificadas por la nomenclatura de T-a, T-b, T-c y T-d (Ver diagrama 2) fig. 22.

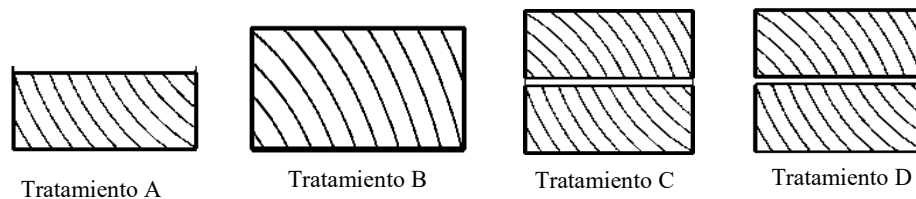


Figura 22 Esquema de los cuatro tratamientos de estudio.

T-a Tratamiento de madera maciza de 2 x 5 cm de sección, **T-b** de madera maciza de 4 x 5 cm de sección, **T-c** de madera-pegamento-madera y **T-d** de madera-malla-madera

Las probetas de material combinado se consideraron con un solo tratamiento con 4 variantes de análisis: para la primera variable (T-a) se ensayaron las probetas de madera maciza con las dimensiones de 2 x 5 cm de sección con 35 cm de longitud, en la segunda variable (T-b) las probetas son de madera maciza de 4 x 5 cm por 35 cm de longitud. En este caso se usó el pegamento para exterior marca Titebond III con acetato de polivinilo.

Para la tercer tratamiento (T- c) son dos piezas con dimensiones de 2 x 5 cm de sección con 35 cm de longitud adheridas con pegamento comercial marca Titebond III, para la cuarta variable (T-d) son dos piezas con dimensiones de 2 x 5 cm de sección con 35 cm de longitud adheridas con pegamento comercial y una malla galvanizada fig. 23, 24.

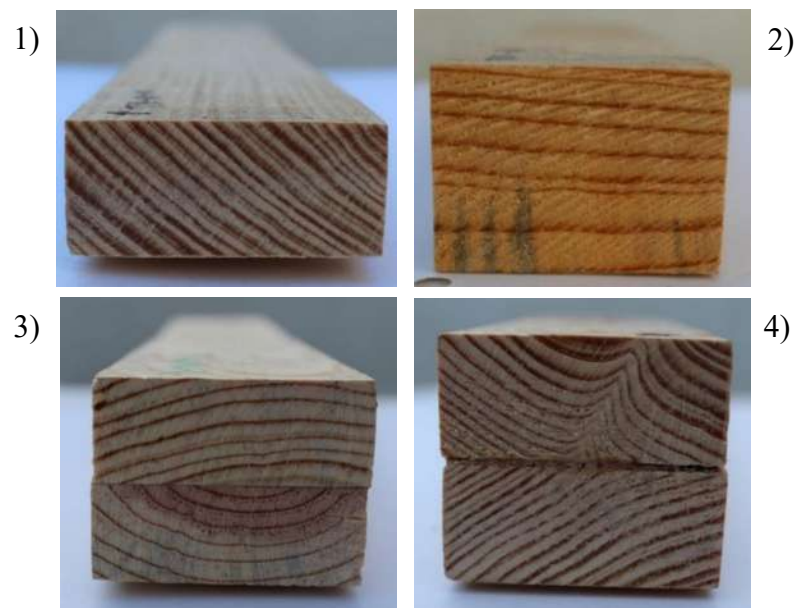


Figura 23 Variantes de las piezas estructurales 1) T-a pieza de madera maciza (testigo),
2) T-b probeta de madera maciza, 3) T-c probeta de madera-madera
y 4) T-d probeta de madera-malla- madera.



Figura 24 **T-a:** madera maciza 2 x 4 x 35 cm, **T-b:** madera maciza 4 x 4 x 35 cm
T-c: listones de madera adheridos con pegamento dimensión total 4 x 4 x 35 cm,
T-d: piezas combinadas de madera adheridas con pegamento y alma de malla metálica dimensión total 4 x 4 x 35 cm.

Las características de los elementos de madera se presentan en la tabla.

Tabla 2 Características del material compuesto

CARACTERÍSTICAS DE MADERA MACIZA Y LA VIGA LAMINADA							
Tratamientos	Especie	Medidas (cm)			Tipo de laminación	Número de láminas	Espesor total (cm)
		Ancho	Espesor	Long.			
Maciza	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5.00	2.00	35	Completa	1	2.00
Maciza	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5.00	4.00	35	Completa	1	4.00
Laminada	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5.00	2.00	35	Completa	2	4.00
Laminada	<i>Pinus pseudostrobus</i>	5.00	2.00	35	Completa	2	4.00

6.2.1 Características de los aceros empleados

En estas probetas se utilizó un alma metálica de malla galvanizada con un diámetro de alambre de 0.29 mm y orificios de dos milímetros, con un grosor de un milímetro y una longitud de 66.5 para el grupo uno y 69 cm de longitud para el grupo dos fig. 25.

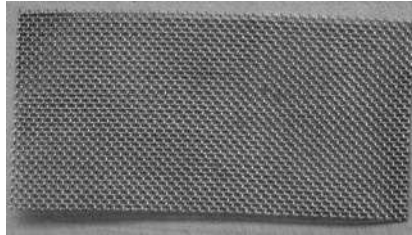


Figura 25 Malla galvanizada.

La malla utilizada para estas probetas es una plancha de metal cortado con aberturas en forma de rombo de 3 x 2 hasta 200 x 80 mm de acero galvanizado e inoxidable (AISI 304 y 316) con un ancho de 4.5 cm con una longitud de 35 cm fig. 26.



Figura 26 Malla galvanizada con aberturas en forma de rombo.

6.2.2 Pegamento

Se probaron distintos pegamentos para las uniones de las piezas de madera-madera y madera- metal-madera. Se utilizó el pegamento de resina epoxica marca sayer lack con un catalizador para resinas de la misma marca, se consideró una proporción 1:1. Las piezas compuestas fueron realizadas y prensadas en frio por un tiempo estimado de 24 h. en una prensa metálica con una medida de 1.40 de altura por 3.30 m fig. 27.



Figura 27 Resina epoxica y catalizador marca sayer lack

Otro pegamento utilizado es pegamento base agua comercial amarillo para madera marca Afix 9500 muy utilizado para hule, cuero, plásticos, laminados, cartón, madera, fibracel, corcho, esponja, hule-espuma, metales, cristal, porcelana, entre otros fig. 28.



Figura 28 pegamento amarillo para madera marca Afix 9500

Pegamento líquido para exterior Titebond formula III con una viscosidad de 4200 cps, compuesto con acetato de polivinilo fig. 29.



Figura 29 Pegamento Titebond III

Para la tercera estructura se llevó a cabo con piezas de madera sólida para una longitud de 40 y 80 cm, se realizó un conector metálico en forma de cruz latina elaborado con solera metálica como se especificó en el capítulo de materiales fig. 30.



Figura 30 Pieza de madera solida con conector metálico.

Para este último caso se elaboró un presupuesto para conocer el costo de las piezas de manera individual, contemplando partidas como el costo de materia prima, material y elaboración de conectores, costo de impregnación de sales CCA, mano de obra, renta de andamios, porcentaje de imprevistos y gastos indirectos.

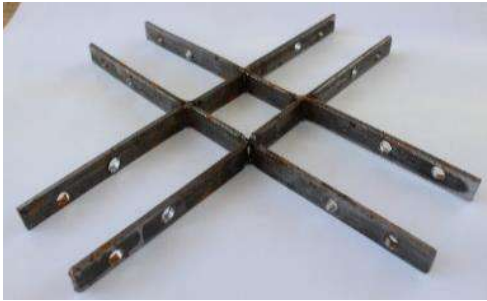
Se obtuvo la madera con medida comercial de 2" x 6" x 8 ft, donde se adquirieron tres piezas de 80 cm y seis de 40 de longitud en cada tablón.

6.2.3 Diseño de conectores

El elemento metálico empleado para este caso fue a base conectores metálicos en forma de cruceta griega con dimensiones de 25 x 25 cm por cada lado y 10 cm para cada cara, se usó solera de acero con dimensiones de ½ pulgada de ancho con dos orificios por cada lado de solera para recibir tornillos fig. 31. La solera es un producto laminado en caliente que se maneja en grado de acero ASTM-A-36, y se suministra en tramos de 6.10 metros.

Se emplearon tornillos 2.5” de longitud, con una tuerca hexagonal de 8 mm de diámetro y dos rondanas de 19 mm de diámetro se usa el acero de bajo carbono SAE 1010 de acuerdo con las normas SAE-J-429 Grado 1, ASTM A-307 Grado A, DIN 267 Clase 4.6 SAE-J-1199 grado 4.6 tabla 3.

a)



b)



Tabla 3 Características de los elementos de resistencia.

Denominación de conector	
Ancho (cm)	2.54 cm
Material	Metal
Abertura	4 cm
Perno usado	
Diámetro de perno (mm)	
Tuerca hexagonal	½ pulgada de diámetro
Tipo de rondana (mm)	19 mm de diámetro

Figura 31 Conector metálico: a) conector metálico en forma de cruz griega, b) tornillo de 2.5” de longitud, rondana de 19 mm y tuerca de forma hexagonal de 8 mm.

7 METODOLOGÍA

Las prácticas de laboratorio en el área de física de la madera se realizaron con la intención de obtener datos físicos y mecánicos de la madera, ya que por su origen biológico se contempla tres direcciones eje tangencia, longitudinal y radial, dichas direcciones dan como resultado distintos tipos de resistencia según sea el eje que se contemple, debido a estas características se considera como un material anisotrópico.

La investigación se dividió en tres etapas, la primera de ellas comprende ensayos preliminares de los elementos estructurales de la madera donde se hizo un análisis de cuatro tratamientos donde se consideró madera-alma de metal con solera-madera, madera-lámina galvanizada-madera, madera-malla galvanizada-madera y la probeta base donde solo se considera madera-madera, para los 4 tratamiento las piezas las dimensiones fueron iguales de 2.5 x 3.5 x 67.5 cm fig. 32.

El segundo se realizó el diseño de las piezas estructurales de forma individual comprendiendo 4 tratamientos de diseño estructural. Para tal caso se fabricaron 140 piezas, 70 de madera maciza, 35 unida con adhesivo y 35 más combinando malla de acero. Las piezas fueron ensayadas a flexión de acuerdo con la norma.

En esta segunda etapa se consideró para el primer tratamiento una probeta testigo con dimensiones de 2 x 5 x 35 cm de madera maciza, para el segundo tratamiento se realizó una probeta de madera maciza con dimensiones de 4 x 5 x 35 cm, para el tercer tratamiento se elaboró una probeta compuesta por dos piezas de madera de dimensiones 2 x 5 x 35 cm y por último se hizo una probeta considerando madera-metal-madera con piezas de madera de dimensiones de 2 x 5 x 35 cm, en los siguientes puntos se hace una descripción para cada uno de los casos.

Para una tercera etapa se realizó un análisis de los elementos estructurales de madera maciza con conectores metálicos ensayados en piezas individuales con dos longitudes diferentes para el primer tratamiento con una sección de 4 x 5 cm por 40 cm de longitud y el segundo tratamiento con piezas de 4 x 5 cm de sección por 80 de longitud.

Se probaron a flexo compresión para obtener resultados de comportamiento de la madera con el conector metálico y los tornillos implementados para cada uno de los casos. Se efectuó un estudio comparativo en las variables de carga, módulo de ruptura y densidad.

Las muestras se obtuvieron al azar, siendo representativas de la calidad de madera usualmente obtenida en las zonas de producción.

Adicionalmente, los modos de fallo y los porcentajes de rotura por madera y adhesivo fueron analizados con el objetivo de evaluar la calidad de la unión. Estos resultados son una primera aproximación sobre el comportamiento estructural de las piezas combinadas. Esta mejora se hace con el objetivo de ver el comportamiento estructural cuando combinamos un material como es el acero con un material biológico.

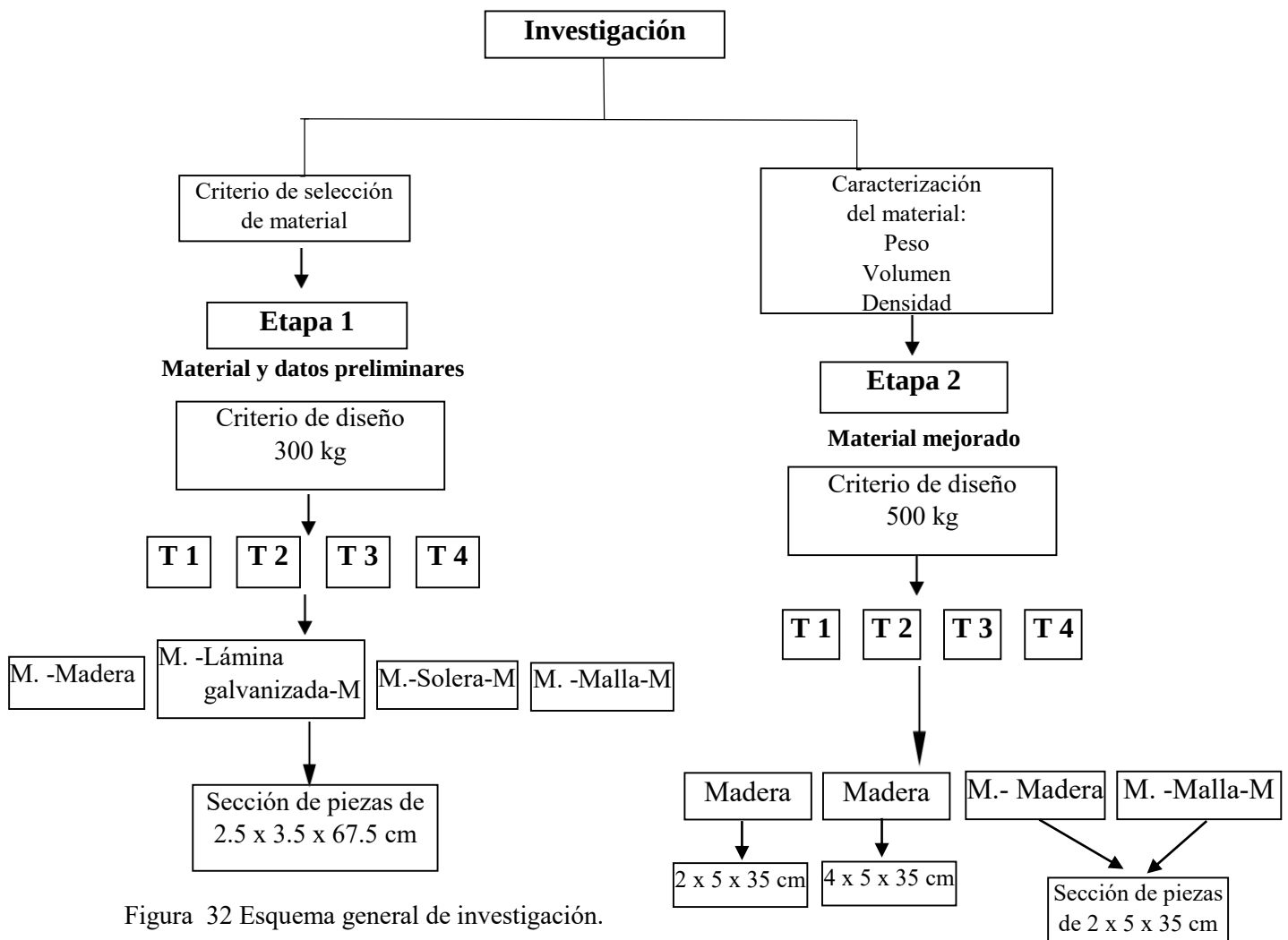


Figura 32 Esquema general de investigación.

7.1 ETAPA 1

En esta etapa las probetas se lijaron y fueron codificadas las piezas de madera para la identificación del tratamiento con las siglas **T1:** TB-a, **T2:** TB-b, **T3:** TB-c y **T4:** TB-d. las mediciones de longitud y peso fueron realizadas por un Vernier y un flexómetro marca Trupper, pesadas en una balanza marca Torrey pcl y para el registro fotográfico se usó una cámara digital marca Canon con lente lens EF-S a 58.

Para ilustrar mejor el proceso se realizaron dos diagramas de flujo donde se exponen los métodos empleados para cada caso de estudio, en el primero se considera las muestras de ensayos previos considerando un criterio de selección del material libre de defectos como nudos, bolsas de resinas, rajaduras, alabeos en las piezas de madera, pudriciones y

hongos. Para la unión de las láminas se considera la orientación de la fibra y los anillos de crecimiento buscando un ángulo de 90° siendo el número de anillos que define la resistencia de la pieza.

El diagrama se dividió en dos partes, el criterio de selección de las piezas de acuerdo con la norma como se explica en capítulo “Las normas de clasificación de la madera”. Se determinaron el número de nudos fijos, nudos sueltos, número de anillos de crecimiento, ángulo de anillos de crecimiento, determinación de la madera de albura y madera de duramen y la densidad para cada elemento.

En este se determina la sección, considerando las probetas de cortas dimensiones y el mismo espesor de las tablas, de tal manera que las piezas soportaran una carga de 300 kg, teniendo un peso aproximado de una persona como carga viva más carga muerta y la carga adicional.

En el diagrama se muestra cómo se dividió la caracterización del material donde se obtuvieron datos como es el volumen y la densidad, posteriormente la preparación del material dividido en dos grupos en el primero se analizaron cuatro tratamientos. De esta manera se determinó el módulo de ruptura (MOR), para cada uno de los tratamientos. En el siguiente esquema se ilustra el proceso que se llevó a cabo para la obtención de los datos en las probetas fig. 33.

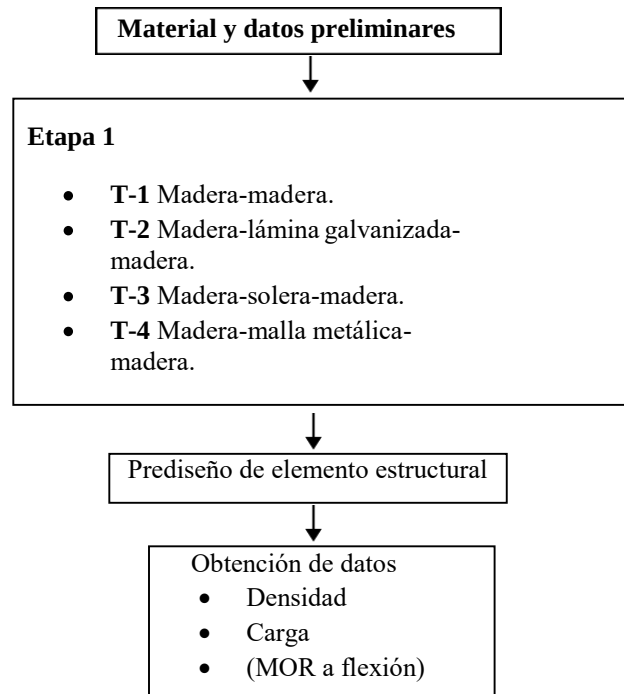
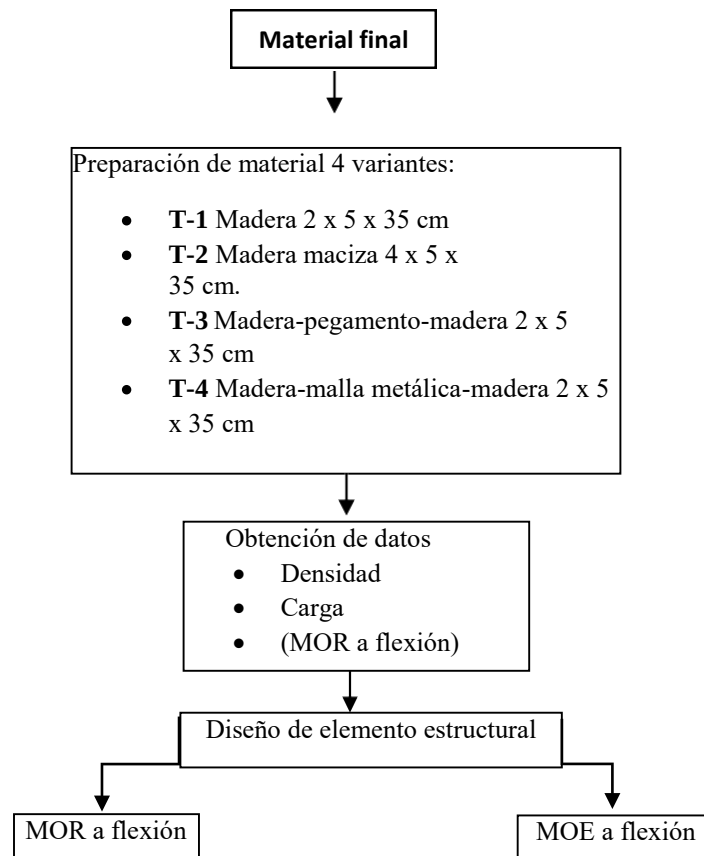


Figura 33 Diagrama de flujo de la metodología experimental.

7.2 ETAPA 2

En este segundo diagrama sigue el mismo criterio de selección de las piezas de acuerdo con la norma. Para este mismo se determina la sección, donde se consideró las probetas de cortas dimensiones, tomando en cuenta el mismo espesor de las tablas, de tal manera que las piezas soportaran una carga de 500 kg, siendo un peso aproximado de una persona como carga viva más carga muerta y la carga adicional.

En el diagrama se muestra cómo se dividió la caracterización del material donde se obtuvieron datos como es el volumen y la densidad. Se llevaron a cabo cuatro tratamientos de análisis, considerando probetas de madera maciza y material combinado madera-madera, madera-metal-madera. De esta manera se determinó el módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad. A continuación, se presenta un diagrama general que ilustra la estrategia experimental diseñada para realizar la



investigación fig. 34.

Figura 34 Diagrama de flujo de la metodología experimental

Las probetas se introdujeron en un cuarto de acondicionamiento, se monitorio la temperatura y la humedad relativa del cuarto de acondicionamiento durante todo el periodo de elaboración de la combinación de material estimando una temperatura de 18-20 °C y una humedad relativa de 55-65 %, el contenido de humedad registrado fue de 12 % de acuerdo con la tabla de porcentaje de humedad relativa y h. r. temperatura en equilibrio para la madera.

Se utilizó un medidor de humedad digital multifunciones y un rango de medición de humedad de 20% al 90%, con una precisión de temperatura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ y precisión de humedad de $\pm 5\%$ RH fig. 35.



Figura 35 Medidor de humedad precisión de temperatura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ y de humedad de $\pm 5\%$ RH.

El contenido de humedad en la madera fue realizado por un higrómetro (medidor de humedad) marca extech, con una medición no invasiva para controlar la humedad en la madera y en otros materiales de construcción. La profundidad de la medición hasta 0,75" (20 mm) por debajo de la superficie. En la pantalla LCD muestra el porcentaje de humedad de la madera o el material de prueba fig. 36.



Figura 36 Higrómetro (medidor de humedad) marca extech.

Después de hacer la caracterización correspondiente las piezas fueron comprimidas en caliente en una prensa hidráulica a una presión de 200 kg/cm^2 considerando un tiempo de 30 minutos para cada probeta a una temperatura ascendente de 20°C a 80°C fig. 37.



Figura 37 **a:** prensa hidráulica, **b:** presando de piezas de madera.

Se hizo una comparación de los resultados obtenidos de las diferentes piezas ensayadas; las secciones de las piezas fueron iguales para cada caso ($2.00 \times 5.00 \text{ cm}$. y longitudes de 35 cm). Se registraron las cargas efectuadas en la máquina universal hasta llevarlas a la carga máxima correspondientes a N/cm^2 para el caso de la deformación se midió con un micrómetro con una precisión de 0.01 mm ubicado en la superficie de la máquina de prueba; el ensayo se continuó hasta la rotura registrándose la carga máxima, la duración en segundos y observaciones relevantes acompañadas de fotografías.

El valor del módulo de rotura (MOR) y del módulo de elasticidad (MOE) se calculó empleando las ecuaciones correspondientes basadas en la norma. En cada muestra se calculó la media, el valor mínimo, el medio y el máximo, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Los ensayos fueron realizados el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en la maquina universal Forney compuesta por dos platinas una fija en la parte inferior y una móvil en la superior, es de tipo electrónico y se puede utilizar hasta una capacidad de carga máxima igual a 150 ton con una aproximación de 250 kg fig. 37.

La carga aplicada se realizó de manera puntual al centro de cada probeta a una velocidad de 6 mm con una separación entre apoyos de 30 cm fig. 38.

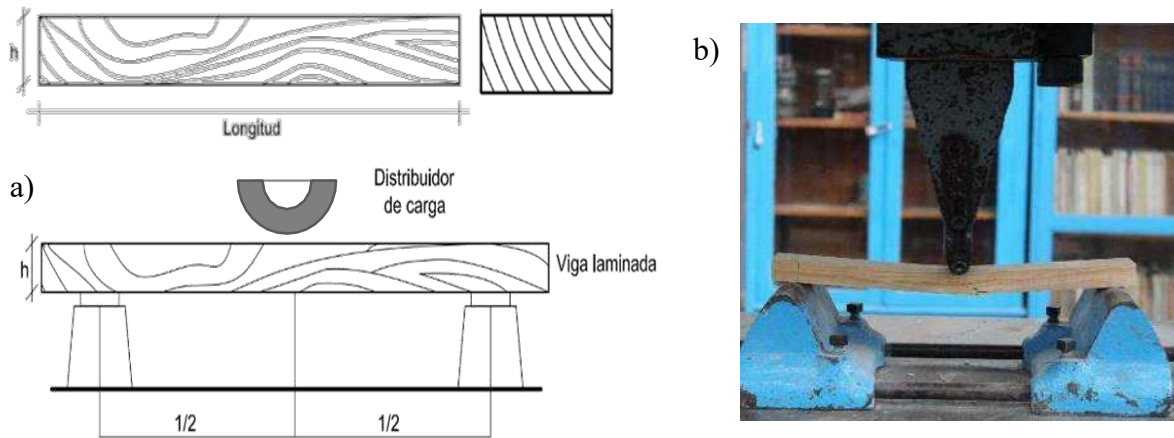


Figura 38 a) Esquema de prueba mecánica, b) Prueba mecánica, fractura ensayo a flexión

El equipo implementado para esta investigación fueron los siguientes:

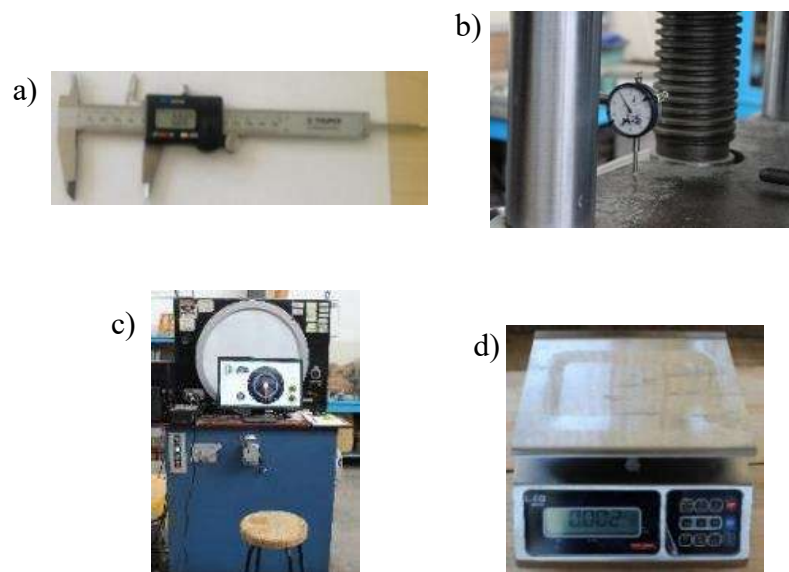


Figura 39 Equipo utilizado: a) Vernier b) Micrómetro de precisión de 0.01 mm., c) Maquina universal Forney, d) bascula marca L-EQ con capacidad de 10kg/max.

7.3 ETAPA 3

En la segunda etapa se lleva a cabo con el mismo criterio de selección de las piezas como los casos anteriores, solo que para este caso la sección determinada se hace pruebas de pieza individual en madera maciza con dimensiones de 4 x 5 cm de sección por 40 cm y 4 x 5 cm de sección por 80 cm con conectores metálico de solera galvanizada.

En el diagrama se muestra cómo se dividió la caracterización del material, donde se obtuvieron datos como es el volumen y la densidad, para este caso se llevaron a cabo dos tratamientos de análisis, considerando probetas de madera maciza con conectores metálicos en forma de cruz latina como se especificó en el capítulo de materiales.

En estas pruebas solo se consideró la carga para cada uno de los tratamientos, donde se analizó los posibles fallos de los conectores y de las probetas de madera. A continuación, se presenta un diagrama general que ilustra la estrategia experimental diseñada para realizar la investigación fig. 40.

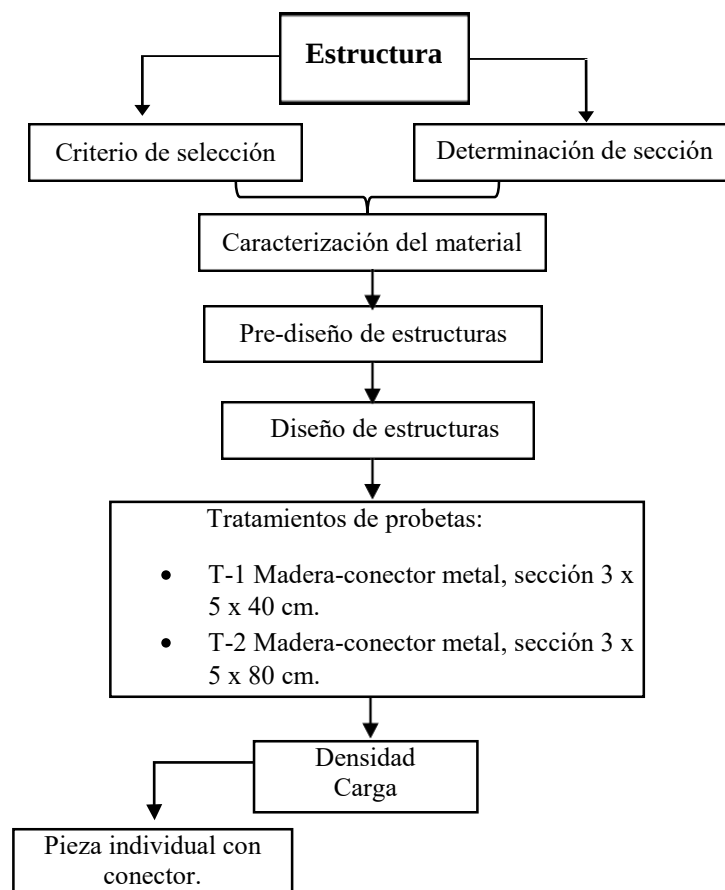


Figura 40 Diagrama de flujo de metodología experimental

Los ensayos fueron de manera individual con conectores metálicos, la carga aplicada fue de manera puntual hasta la falla de las probetas o del conector metálico, las dimensiones fueron de 40 y 80 cm de longitud, los apoyos fueron en el conector para comprobar el comportamiento de los pernos y los conectores metálicos considerando el diseño cruz latina.

Como un último caso dentro de la misma etapa se hizo dos cuadrantes estructurales el primero formado por piezas de 5 x 10 cm de sección por 40 cm de longitud, el segundo las piezas son de 5 x 10 cm de sección por 80 cm de longitud, fueron unidos con conectores metálicos hechos de solera galvanizada de ½" en forma de cruz latina para sus cuatro puntos de apoyo.

Los ensayos fueron realizados el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil en la maquina Universal Forney la carga fue de manera distribuida en los cuatro extremos del cuadrante, uniformemente distribuida.

La carga aplicada se realizó de manera puntual al centro de cada probeta a una velocidad de 6 mm con una separación entre apoyos de 40 y 80 cm de longitud con cuatro piezas para cada caso unida con el conector metálico fig. 41.

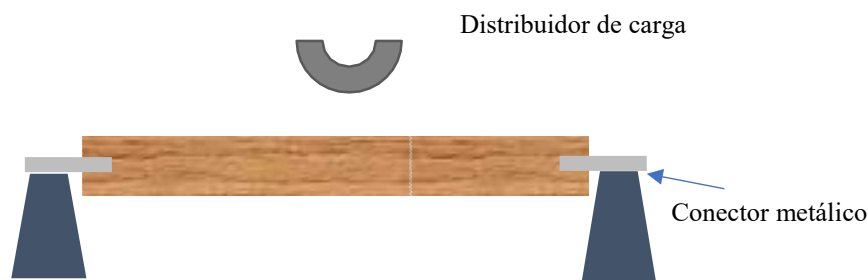


Figura 41 Esquema de prueba mecánica.

8 RESULTADOS

Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) variables cuantitativas como MOR y MOE, con un nivel de significancia de un 95%; para realizar la comparación entre los diferentes tratamientos.

La prueba de Tukey nos permitió ver la diferencia entre los grupos de análisis, para saber estas diferencias se obtuvo el valor de q (valores críticos de las tablas de prueba de Tukey) los grados de libertad dentro de los grupos con valor de significancia de 0.05; el cuadrado del error medio obtenido de la división de la suma de cuadrados y los grados de libertad dentro de los grupos y el número de muestra de cada grupo permitió el cálculo de la diferencia de las medias.

8.1 ETAPA 1

Esta primera etapa se realizó para ver el comportamiento mecánico de las piezas y del pegamento utilizado, dichas piezas se obtuvieron de un tablón de madera de pino, posteriormente se llevaron a cabo cuatro números de muestras con 4 diferentes tratamientos, cabe mencionar que la finalidad de realizarlos fue para seleccionar la pieza con mejor comportamiento debido a el alma metálica en su interior fig. 44.

Para este caso el alma de acero propuesto para las piezas ensayadas es de solera galvanizada con una longitud de 67.5 con un espesor de 3 mm, una malla de acero inoxidable y lámina galvanizada de calibre 1 mm con una longitud de 67.4 en la tabla 5 podemos apreciar los valores de las variantes analizadas.

8.2 DISEÑO DE ELEMENTOS DE MADERA



Figura 42 Muestras de la etapa 1, T-1 con solera, b) T-2 con malla galvanizada, c) T-3 con malla metálica y d) T4 madera-madera.

Resultados preliminares de elementos estructurales

Se seleccionó el tratamiento con mejores resultados siendo este el T-4 madera-malla metálica-madera, al aplicar un esfuerzo la carga que soporto es de 750 kg presentando una falla en el centro de la probeta, considerando los anillos de crecimiento con una orientación de manera vertical por lo tanto proporciona una pieza más resistente, no se observa desprendimiento en ningún área de la probeta fig. 43.

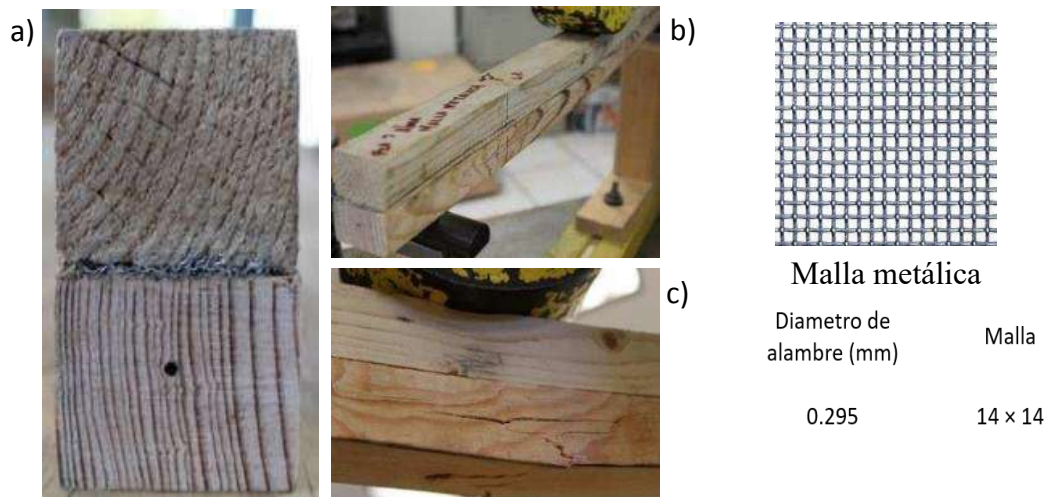


Figura 43 a) pieza de madera compuesta con malla galvanizada, b) pieza sometida a flexión, c) falla de la pieza.

En la tabla 4 se muestra un resumen de los valores obtenidos de los tratamientos ensayados mecánicamente, reportando variable como densidad, el MOR y las características de la pieza diseñada.

El tratamiento con mayor carga (kg) fue el tratamiento 4 con malla galvanizada, por lo tanto, la más baja fue el tratamiento sin alma de metal, en cuanto al módulo de ruptura el tratamiento más alto es el 4 con malla galvanizada con un valor de 193.866 kg/cm^2 , mientras que el tratamiento más bajo es el que no tiene alma con un valor de 106.41 kg/cm^2 .

Tabla 4 valores mecánicos de la pieza ensayadas mecánicamente.

Tratamiento	Alma	Densidad (gr/cm ³)	Carga (kg)	MOR (kg/cm ²)
1	Sin alma	0.485	378	106.41
2	Lámina galvanizada	0.527	645	168.45
3	Solera acero	0.648	641	164.25
4	Malla galvanizada	0.529	750	193.86

8.3 ETAPA 2

Los resultados obtenidos para la densidad, módulo de ruptura (MOR), el módulo de elasticidad (MOE) y los valores de carga-tiempo se presentan en las siguientes tablas y gráficas.

Estos resultados concuerdan con los establecidos por la norma IRAM 9662-3 (2006) y con estudios realizados (Haselein, 2000) que afirman una relación directa entre el tamaño de los anillos de crecimiento y la densidad.

Los valores medios de la densidad, módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) se alcanzaron resultados altos lo cual confirman el comportamiento mecánico de la especie estudiada en este trabajo ver las siguientes tablas y gráficas.

Para las probetas con clave TB-a los valores alcanzados en la densidad promedio 576.07 kg/m^3 con un valor máximo de 759.01 kg/m^3 y un mínimo de 435.03 , los valores promedio para tiempo fueron de 225.6857 con un máx. 922 seg. y min. de 35 seg. y carga 604.857 promedio, con un máx. 822 y un min. de 354 con un valor promedios para (MOR) de 1222.80 kg/cm^2 ver tabla 6,7,8.

Para este caso se realizaron 4 variantes para la elaboración de piezas de madera compuesta para el primer caso la probeta fue identificada con la serie de TBN- a, con medidas de $5 \times 4 \times 35 \text{ cm}$. Para el análisis de los datos se realizaron regresiones lineales contemplando las variables densidad, (MOR), número de anillos de crecimiento, ángulo de anillos de crecimiento, carga aplicada y el tiempo de carga.

Dado que la densidad fue determinada en los 140 cuerpos de prueba ensayados mecánicamente, fue posible analizar la relación entre éstas y las propiedades mecánicas con un soporte estadístico. Las siguientes figuras se presentan la relación entre la densidad y las propiedades mecánicas, presentando en cada caso el valor del coeficiente de determinación (R^2) y la ecuación de la recta de regresión lineal. Es posible observar que en los casos analizados se registraron relaciones positivas y negativas significativas.

8.3.1 Tratamiento 1 T-a (madera solida 2 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)

Para esta primera variante de muestra se analizó la densidad, MOR, MOE, tiempo y carga aplicada como se muestra en la tabla 5. Podemos notar el promedio de las variables antes mencionadas con un MOR de 1222.80 , un min de 70917 y un máx. de 1668.15 .

Tabla 5 Valores de densidad de T1-A

Valores	Tiempo (s)	Carga (kg)	Densidad Kg/cm^2	MOR Kg/cm^2	MOE Kg/cm^2
Promedio	225.68	604.85	576.07	1222.80	138,308.69

En la fig. 44 se ilustra una de las piezas ensayadas mecánicamente, mostrando características como el número de anillos de crecimientos y el ángulo, dicha pieza alcanzo un mejor comportamiento a flexo compresión.

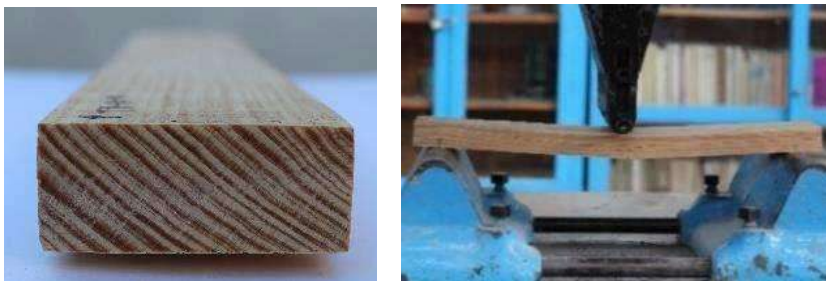


Figura 44 a: ángulo de anillos de crecimiento, **b**: prueba mecánica a flexión

En los siguientes gráficos se exhibe los datos de la deformación unitaria de las pruebas mecánicas realizadas MOE módulo de elasticidad, el cual se tiene tres gráficos para cada una, la deformación más baja, la media y la más alta, con su valor máximo y en módulo de ruptura de las piezas.

10.3 T-1 Graficas de deformación unitaria

En la fig. 45 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza con clave T-6-a donde se ve una tendencia ascendente continúa lo cual indica la deformación siendo parcialmente constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.023 mm, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación y obteniendo un soporte de carga de 475 kg.

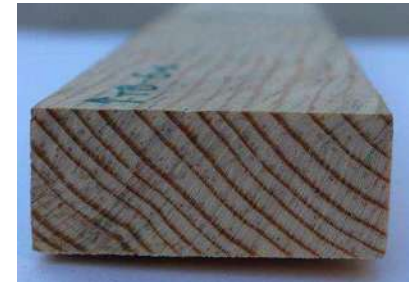
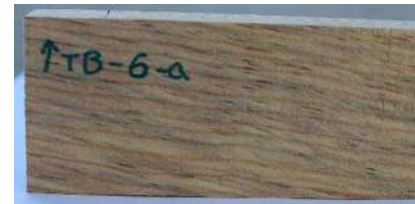
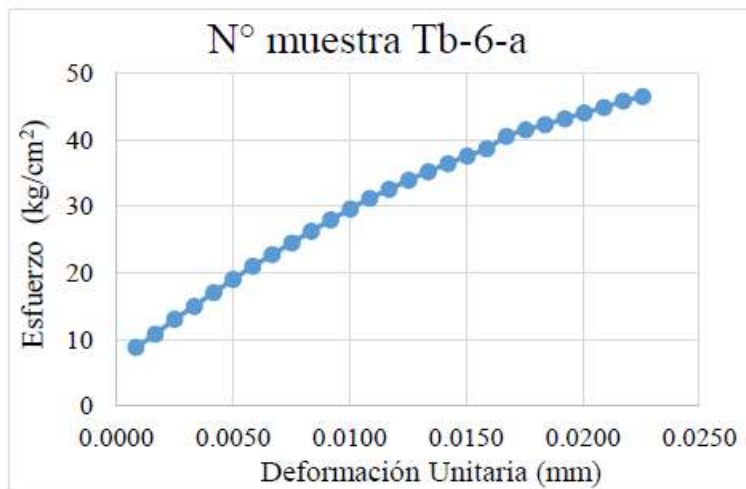


Figura 45 a) gráfico de la deformación unitaria para T-6-a,
b) piezas de madera solida

Para la pieza con clave T-4-a como se ve en la fig. 46 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza al incrementar carga, donde se ve una tendencia ascendente continúa lo cual indica la deformación constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.042 mm, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación que se tiene y un soporte de carga de 668 kg.

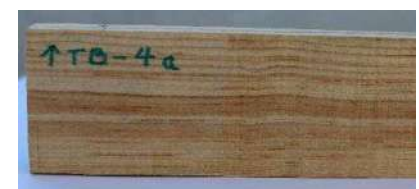
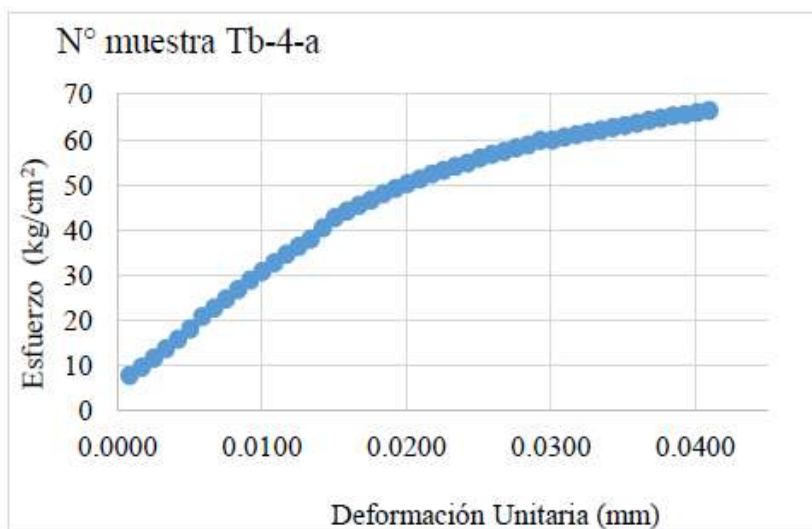


Figura 46 a) gráfico de la deformación unitaria para T-4-a ,b) pieza de madera solida

Para este caso la pieza del tratamiento T-2-a no se observa una deformación constante como en las piezas anteriores ya que esta pieza comenzó a fracturarse desde los 0.006 mm, posteriormente se estabiliza y tiende a ser constante hasta llegar a los 0.030 mm donde la deformación incrementa relacionado con el peso que se le aplica, considerando una de las posibles causas es que fallan las fibras internas es lo que se ve reflejado en la fig. 47 dicha deformación comienza en 0.001 mm y termina en 0.041 mm con una carga máxima soportada de 822 kg.

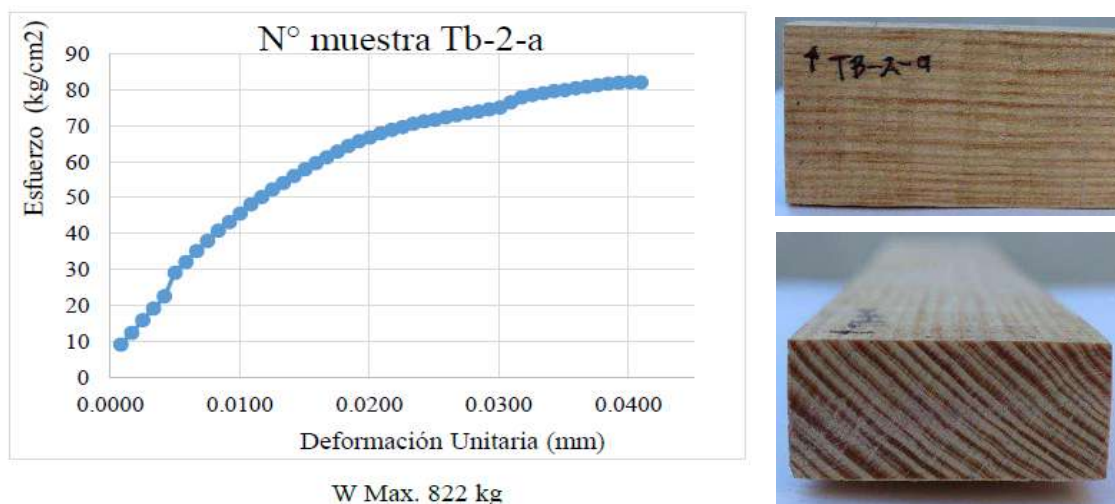


Figura 47 a) Grafico de la deformación unitaria para T-4-a,
b) pieza de madera solida

8.3.2 Tratamiento 2 T-b (madera solida 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)

Para esta segunda variante en las muestras se analizaron la densidad, el MOR, el MOE, el tiempo y la carga aplicada como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 Valores de densidad T 2-b

Valores	Tiempo (s)	Carga (kg)	Densidad Kg/cm ²	MOR Kg/cm ²	MOE Kg/cm ²
Promedio	94.66	1,502.02	590.94	1,704.93	198,798.2

8.3.3 Variable T 3-c (madera compuesta 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)

En la tercera variante se analizó la densidad, el MOR, el MOE, el tiempo y la carga aplicada como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7 valores de densidad T 3-c

Valores	Tiempo (s)	Carga (kg)	Densidad Kg/cm ²	MOR Kg/cm ²	MOE Kg/cm ²
Promedio	164.09	1639.11	1129.78	823.78	697,478.22

En la fig. 48 se ilustra una de las piezas ensayadas mecánicamente, donde se observan las características, como son el número de anillos de crecimientos y el ángulo de inclinación de la madera, las piezas mostradas alcanzaron un mejor comportamiento a flexo compresión (el desprendimiento que sufre las piezas al aplicar una fuerza determinada)

T3-5-c

T3-3-c

T3-12-c

T3-34-c

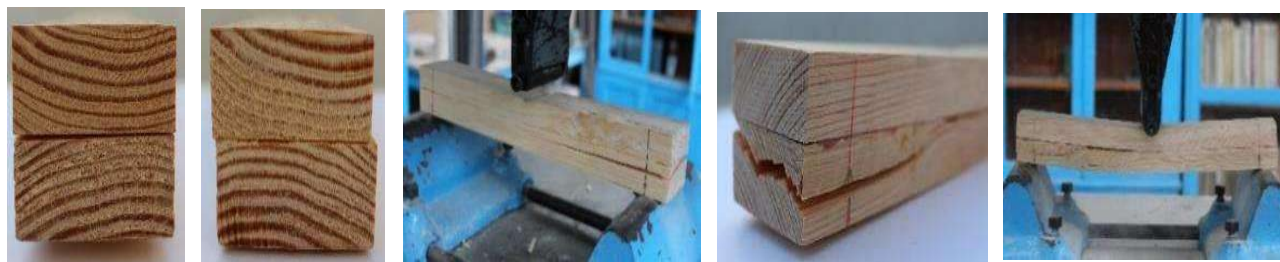


Figura 48 probetas estructurales de madera de *Pinus pseudostrobus* L.

La colocación de la pieza en el sentido contrario entre los anillos de crecimiento como se ve en la fig. 48 es una de las piezas con mejor comportamiento mecánico, ya que debemos tomar en cuenta que son dos trozos de madera solida unidas y a pesar de eso trabajan como si se tratara de una sola.

En los siguientes gráficos se muestra los datos de la deformación unitaria de las pruebas mecánicas realizadas MOE módulo de elasticidad, el cual se tiene tres gráficos para cada una, la deformación más baja, la media y la más alta, con su valor máximo y en módulo de ruptura de las piezas.

8.3.4 T-2 Grafica de deformación unitaria

En la fig. 49 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza con clave T-6-c donde se ve una tendencia ascendente continua lo cual indica la deformación siendo parcialmente constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.031 mm hasta falla soportando una carga máxima de 1 163 kg, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación que se tiene el comportamiento de la pieza al aplicar una carga y un soporte de carga.

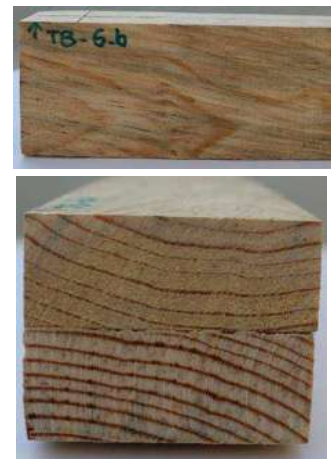
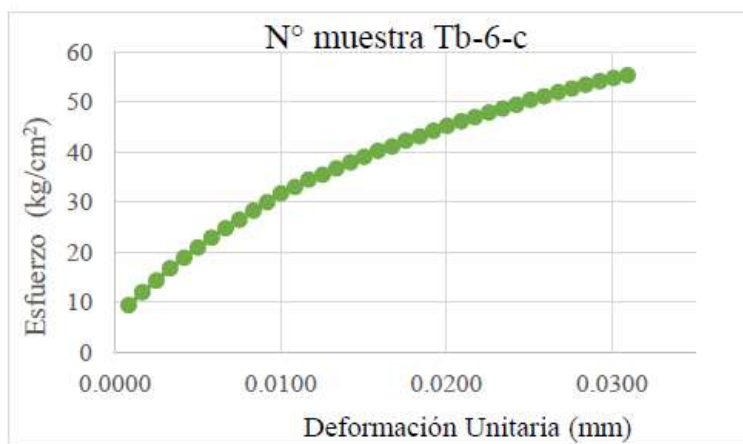


Figura 49 a) grafico de la deformación unitaria para T-6-b,
b) pieza de madera solidad pegadas sin alma metálica

Para la pieza con clave T-1-c como se ve en la fig. 50 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza al incrementar carga, donde se ve una tendencia ascendente continua lo cual indica la deformación constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.035 mm, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación que se tiene y un soporte de carga de 668 kg, ver fig. 85.

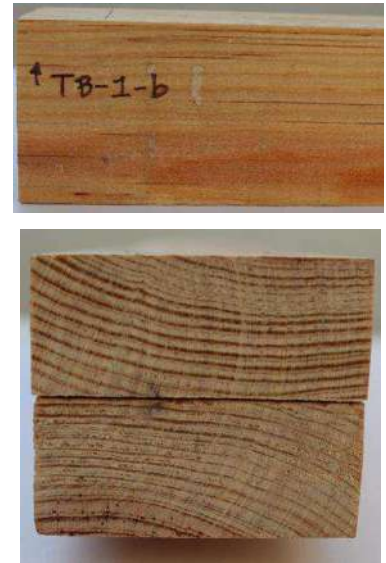
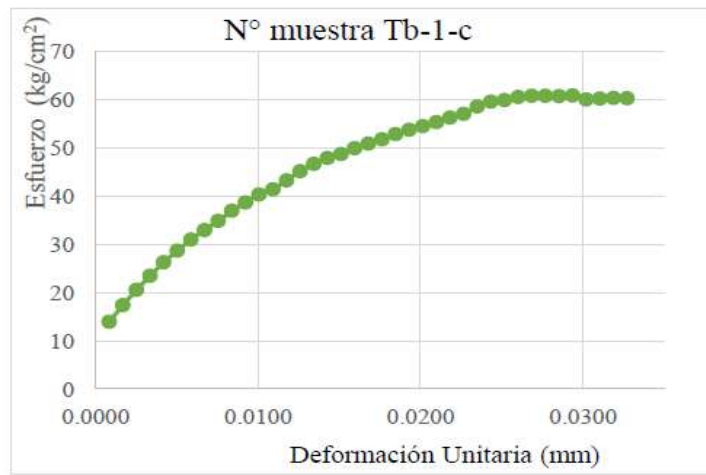


Figura 50 a) grafico de la deformación unitaria para T-1-b, b) pieza de madera sólida.

Para este caso la pieza con clave de T-4-c no se observa una deformación constante como en las piezas anteriores ya que esta pieza comienza a fracturarse desde los 0.006 mm, posteriormente se estabiliza y tiende a ser constante hasta llegar a los 0.030 mm donde la deformación incrementa relacionado con el peso que se le aplica una de las posibles causas es que fallan las fibras internas es lo que se ve reflejado en la fig. 51 dicha deformación comienza en 0.001 mm y termina en 0.041 mm con una carga máxima soportada de 822 kg.

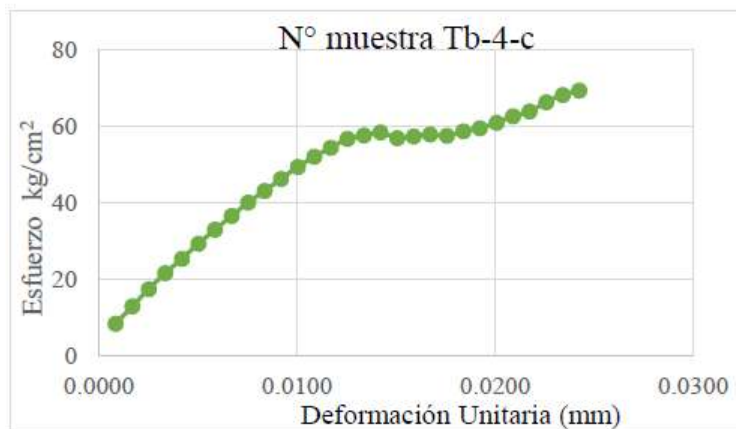


Figura 51 a) gráfico de la deformación unitaria para T-4-b, b) pieza de madera sólida

8.3.5 Tratamiento 4 T4-d (madera compuesta 4 x 5 cm de sección y 35 cm de longitud)

En esta variante se muestra el análisis que existe entre la densidad, el MOR, el MOE, el tiempo y la carga aplicada, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8 valores de densidad T4-d

Valores	Tiempo (s)	Carga (kg)	Densidad Kg/cm ²	MOR Kg/cm ²	MOE Kg/cm ²
Promedio	149.02	1485.17	1139.41	758.13	1,519,138.02

En la fig. 52 se ilustra algunas de las piezas ensayadas mecánicamente, exhibiendo características como el número de anillos de crecimientos y el ángulo. La selección de las probetas de madera se realizó mediante la clasificación de los diferentes comportamientos que presentaron al ser ensayadas.

En la fig. 52 se ve claramente las piezas unidas con el pegamento comercial establecido, las características de las piezas como el número de anillos de crecimiento y ángulo de los anillos el comportamiento de la pieza.

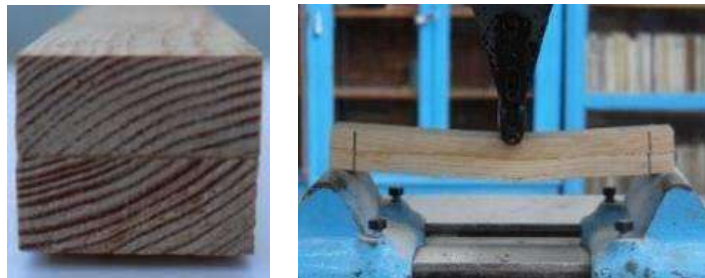


Figura 52 Pieza de madera compuesta clave Tb-25-d

En la fig. 53 se observa la falla de la probeta al ser cargada al centro, siendo la parte inferior que se encuentra a tensión la que falla, debido la malla que se encuentra en medio de las piezas de madera evita el colapso total de la probeta de madera, prolongando de esta manera el tiempo de falla, en este caso no sufre desprendimiento.



Figura 53 Pieza de madera compuesta clave T4-30-d

En la fig. 54 en este caso sucede algo similar que la pieza T4-30-d, el único comportamiento distinto es que sufre un ligero desprendimiento en las partes exteriores en ambos lados.

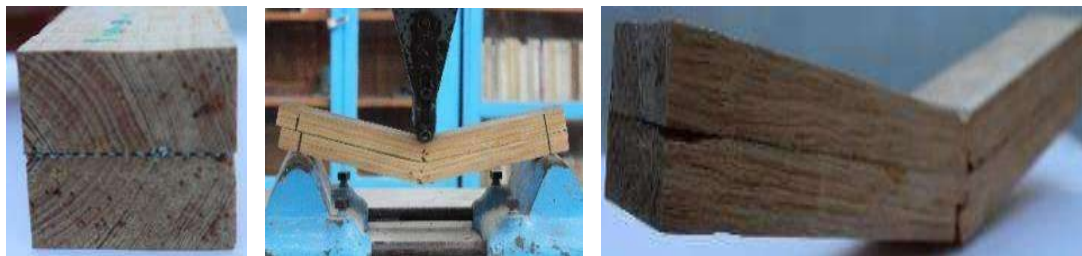


Figura 54 Pieza de madera compuesta clave T4-31- d

En la fig. 55 se ve el acomodo de los anillos en su totalidad de manera horizontal, también se ve la falla de la pieza al ser cargada de manera puntual al centro de la probeta, siendo la parte inferior que se encuentra a tensión, debido la malla que se encuentra en medio de las piezas de madera evita el colapso total de la probeta de madera, prolongando de esta manera el tiempo de falla, en este caso sufre desprendimiento en el centro de la pieza.



Figura 55 Pieza de madera compuesta clave T4-32-d

En los siguientes gráficos se exhibe los datos de la deformación unitaria de las pruebas mecánicas realizadas MOE módulo de elasticidad, el cual se tiene tres gráficos para cada una, la deformación más baja, la media y la más alta, con su valor máximo y en módulo de ruptura de las piezas.

8.3.6 T4-d Graficas de deformación unitaria

En la fig. 56 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza con clave T4-6-d donde se ve una tendencia ascendente continúa lo cual indica la deformación siendo parcialmente constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.031 mm hasta falla soportando una carga máxima de 1215 kg, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación que se tiene el comportamiento de la pieza al aplicar una carga y un soporte de carga.

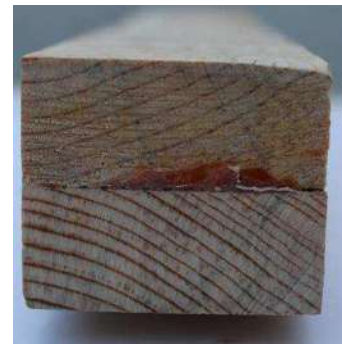
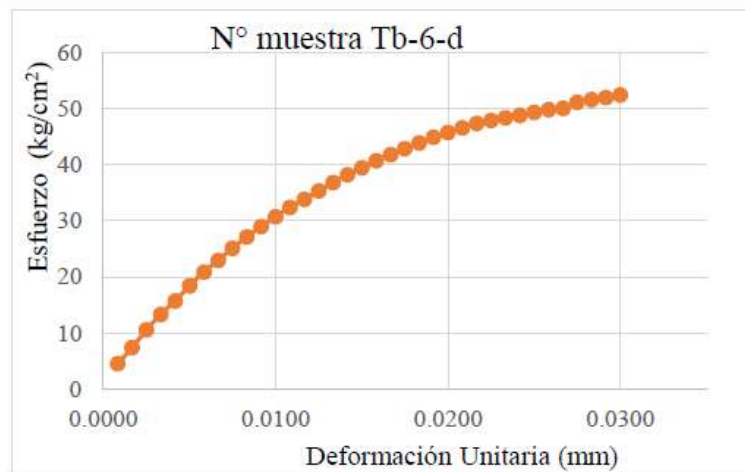


Figura 56 a) Grafico de la deformación unitaria para T4-6-d, b) pieza compuesta con madera y malla metálica.

Para la pieza con clave T4-1-d como se ve en la fig. 57 se observa la deformación en milímetro que sufre la pieza al incrementar carga, donde se ve una tendencia ascendente continua lo cual indica la deformación constante comenzando en 0.001 mm y alcanzando una deformación de 0.039 mm, de acuerdo con el número de anillos de crecimiento y el ángulo de inclinación que se tiene y un soporte de carga de 1664 kg.

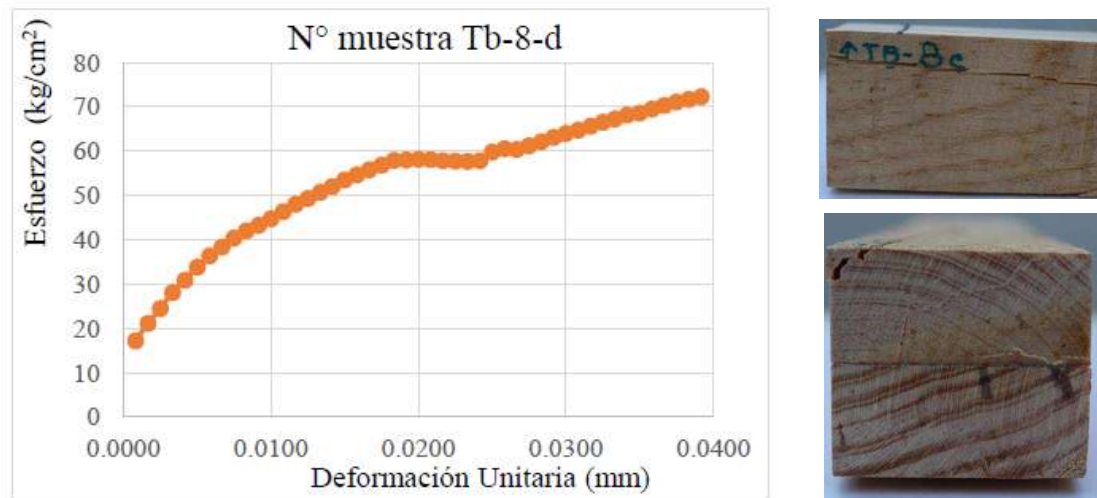


Figura 57 a) Gráfico de la deformación unitaria para T4-8-d, b) pieza compuesta con madera y malla metálica.

Para este caso la pieza con clave de T4-4-d no se observa una deformación constante como en las piezas anteriores ya que esta pieza comenzó a fracturarse desde los 0.001 mm, posteriormente se estabiliza y continua con su deformación esta incrementa relacionado con el peso que se le aplica una de las posibles causas es que fallan las fibras internas es lo que se ve reflejado en la fig. 58 dicha deformación comienza en 0.001 mm y termina en 0.035 mm con una carga máxima soportada de 1989 kg.

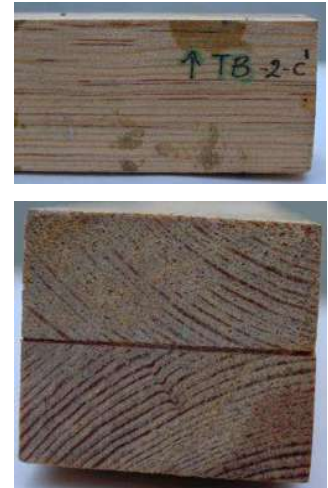
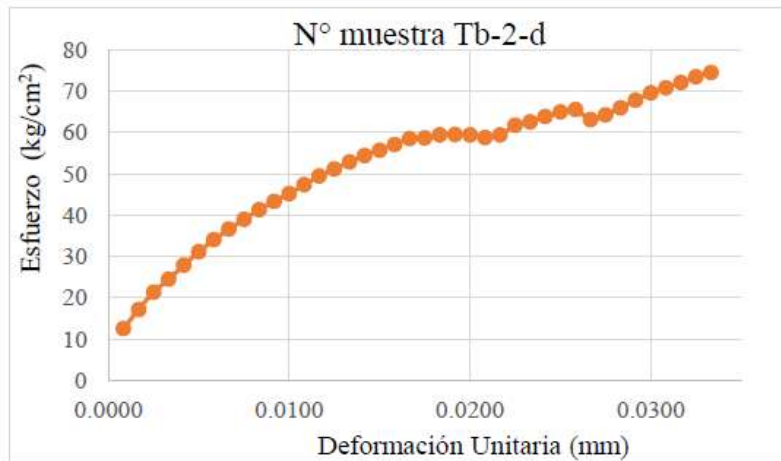


Figura 58 a) Grafico de la deformación unitaria para T4-4-d, b) pieza compuesta con madera y malla.

9 ANÁLISIS DE VARIANZA

El cuadro de análisis de varianza es el primer resultado analizado. En este punto se pudo considerar que la variable explicativa elegida, dio origen a una cantidad de información significativa al modelo (hipótesis nula H_0) o no.

En el análisis estadístico de los resultados la prueba utilizada es la prueba F de Fisher, donde se mostró que existe una diferencia significativa entre las pruebas, con un nivel de confianza del 95%.

9.1 VARIABLE DE DENSIDAD

El análisis de varianza para densidad da un valor de F calculada de 192.05 con una probabilidad de 1.075 y un valor crítico de 2.67, por lo tanto, se dice que hay una diferencia significativa entre los grupos para la variable de densidad, de acuerdo con los datos obtenidos como se muestran en la tabla 9.

Nota: si la **F** calculada es mayor que la **f** del valor crítico se dice que existe una diferencia significativa.

Tabla 9 análisis de varianza de densidad

Resultado			Tabla F
Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	192.05	1.075E-48	2.67

En la fig. 59 se observa las cuatro densidades que se tiene el tratamiento 1 al tratamiento 4, mientras que en el tratamiento dos se aprecia una densidad constante en todas las 35 piezas de estudio mientras que en los tratamientos 3 y 4 no se aprecia la densidad de manera constante, una razón de las posibles razones es porque en estas dos variantes son probetas compuestas adheridas con pegamento como ya se mostró anteriormente.

El diagrama de cajas mostrado en la fig. 59, se comparan los resultados de las diferentes densidades de los 4 tratamientos de muestras, separando en dos grupos, el primero de ellos interviene la variable Tb-a y la variable Tb-c, siendo estas las probetas de madera sólida, un segundo grupo lo conforma la variante Tb-c y la variante Tb-d, aquí la conforma las piezas unidas con pegamento fig. 60.

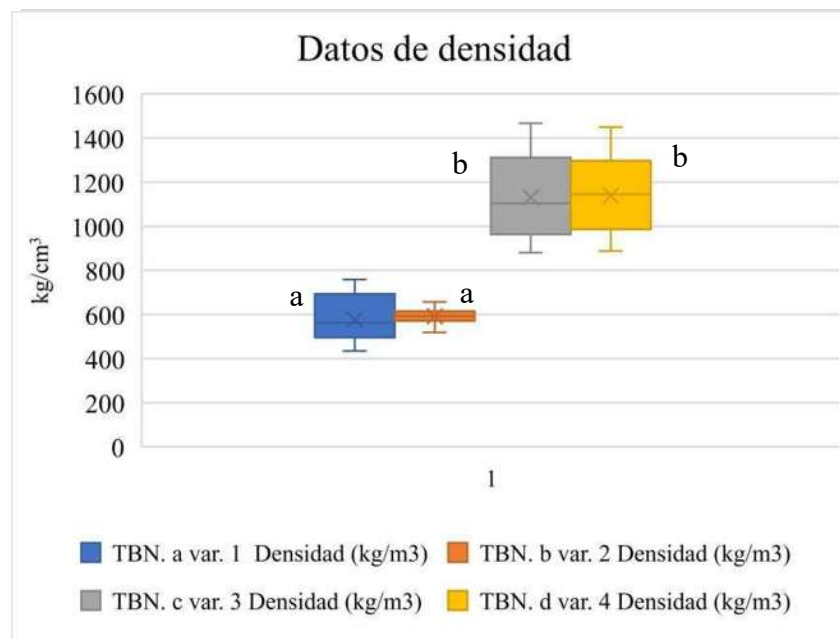


Figura 59 diagrama de cajas y bigotes de la variable de densidad

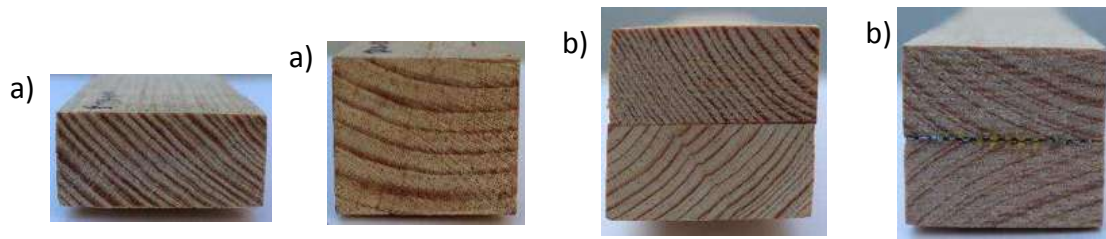


Figura 60 a) Tb-a var.1, b) Tb-b var.2, c) Tb-c var. 3 y Tb-d var. 4

Una prueba que nos permite evaluar dicha diferenciación es la prueba de Tukey, que mide la diferencia de los valores de las medias de dos grupos en términos de la varianza intragrupal. Para el análisis de Tukey lo separa y analiza por grupos comparándolos entre ellos mismos para encontrar si existe defenecía significativa entre las pruebas realizadas.

En la fig. 61, 62 se muestra claramente la separación de los dos grupos creada por la prueba de Anova y Tukey, agrupando las piezas solidas contra las piezas compuestas por el tratamiento que se tiene hay una diferencia considerable como ya se mencionó con anterioridad.

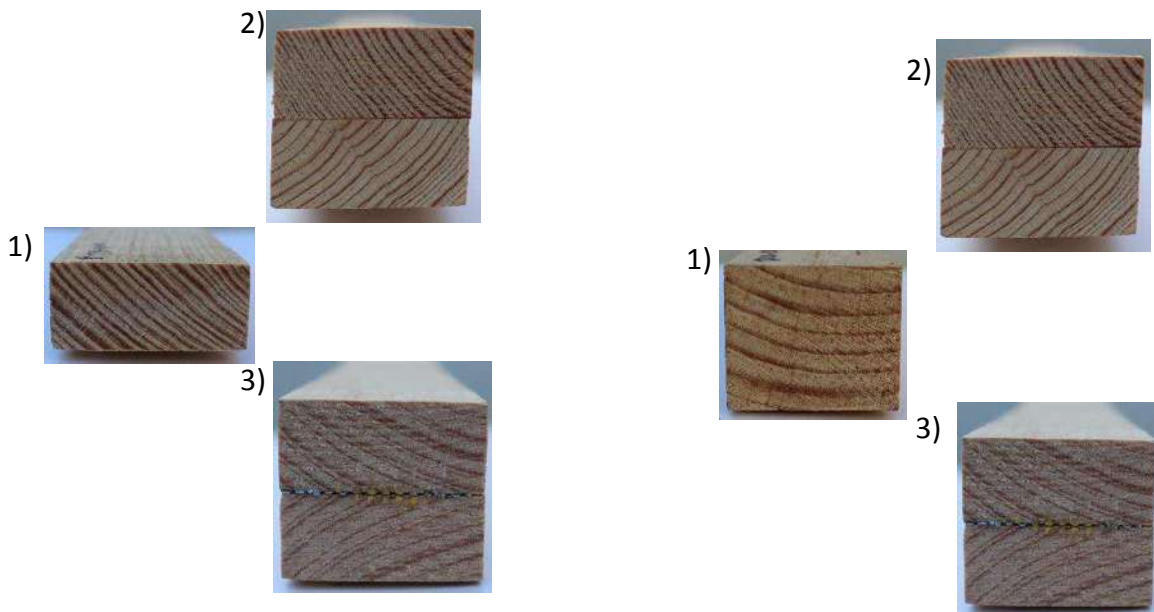


Figura 61 1) pieza solida Tb-a, 2) pieza compuesta Tb-c y 3) pieza compuesta Tb-d.

Figura 62 1) Pieza solida Tb-b, 2) pieza compuesta Tb-c y 3) pieza compuesta Tb

9.2 VARIABLE DE MÓDULO DE RUPTURA (MOR)

El análisis de varianza para el MOR da un valor de F calculada de 86.406 con una probabilidad de 2.38 y un valor crítico de 2.671, por lo tanto, se dice que hay una diferencia significativa entre los grupos, de acuerdo con los datos obtenidos como se muestran en la tabla 10.

Nota: si la F calculada es mayor que la f del valor crítico se dice que existe una diferencia significativa.

Tabla 10 análisis de varianza del MOR.

Resultado		Tabla F	
Origen de las variaciones	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	86.406	2.38E-31	2.671

En la fig. 63 se observa las variaciones que existe en el módulo de ruptura para cada una de las pruebas analizadas siendo las probetas de piezas solidas con clave Tb-a y Tb-b que presentan un porcentaje mayor de ruptura que las piezas compuestas con clave Tb-c y Tb-d.

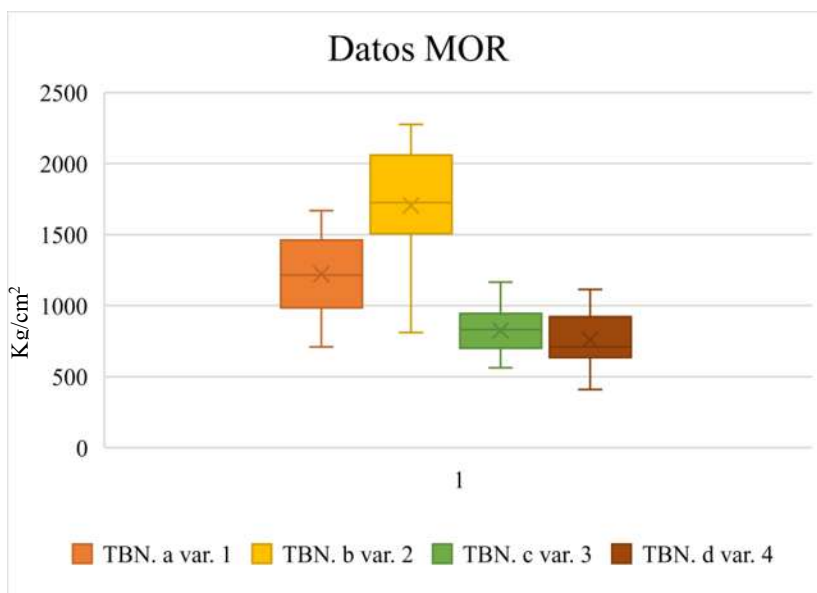


Figura 63 diagrama de caja y bigotes de la varianza del MOR

Presentando las probetas T2-b con mayor porcentaje a pesar de su sección estas piezas resultan menos elásticas y más propensas a una falla, mientras que las probetas con clave T4- d debido al tratamiento con el que están elaboradas estas piezas su falla a la ruptura es inferior, se pudo observar al momento de realizar la prueba que su colapso era nulo por lo tanto la falla se iba haciendo por sección en determinado tiempo sin llegar al punto crítico que sería el colapso, eso comparado con las piezas de madera solida sin algún compuesto.

Si este fenómeno lo traspolamos a una viga con dimensiones reales en condiciones de carga en algún edificio, y dicha estructura sufre un colapso esto avisaría por lo tanto se haría por secciones y por un tiempo determinado, antes que la pieza sufra un colapso por completo lo que sería igual a tiempo ganado en las estructuras de madera lo que no pasa con las estructuras metálicas cuando se aplica calor.

El diagrama de cajas mostrado en la fig. 63, se comparan los resultados de las diferentes MOR en las 4 variantes de muestras, separando en tres grupos, el primero de ellos interviene la variable T1-a, siendo estas las probetas de madera sólida, un segundo grupo lo conforma la variate T2-b y un tercer grupo la compone la variante T3-c y T4- d, aquí la conforman las piezas unidas con pegamento fig. 64.

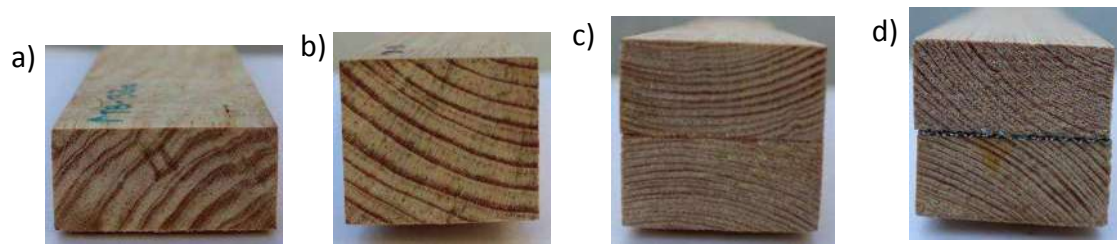


Figura 64 a) T1-a, b) T2-b, c) T3-c y T4-d.

Una prueba que nos permite evaluar dicha diferenciación es la prueba de Tukey. En la tabla 15 se muestra los resultados de análisis, confrontándose las diferentes variantes de análisis, donde encontramos diferencia significativa en las casillas marcadas, formando tres grupos de muestras, por ejemplo, la variante T1-a con las variantes T2-b, T3-c y T4- d, existe una diferencia significativa, otra diferencia encontrada se forma dos grupos es en la variante T2- b con las variantes T3-c y T4-d.

En la fig. 65 y 66 se muestran claramente la separación de los tres grupos creada por la prueba de Anova y Tukey, agrupando las piezas solidas contra las piezas compuestas por el tratamiento que se tiene hay una diferencia considerable como ya se mencionó con anterioridad.

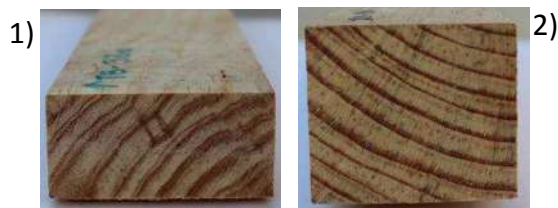


Figura 65 1) Pieza solida T1-a, 2) pieza solida T2-b

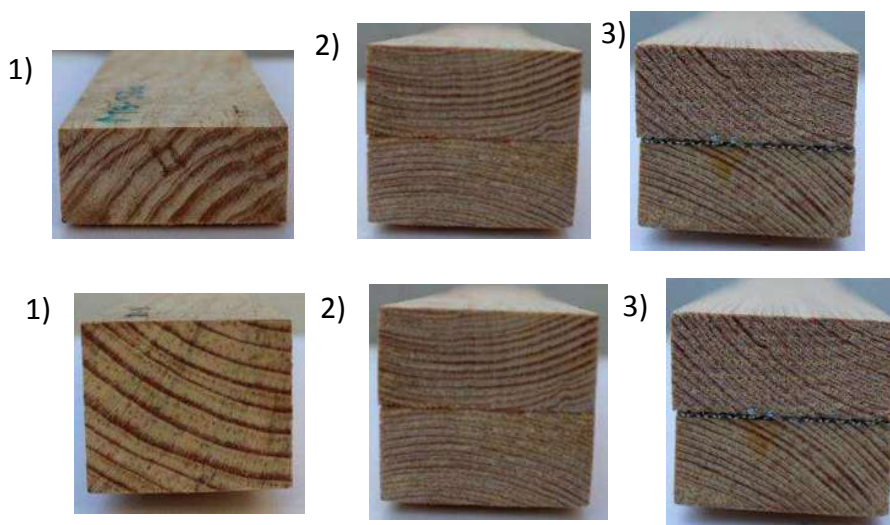


Figura 66 1) Pieza solida T1-a, 2) pieza compuesta T3-c y 3) pieza compuesta T4-d.

Se han publicado valores de la densidad obtenidos sobre madera de árboles de *pinus pseudostrobus* L. con mayor edad. Para la madera (12 % de CH) producida con árboles con 70 años crecidos en Nueva Zelanda y Australia, Nicholas y Brown 2002, informan valores de esta propiedad física oscilando entre 640 kg/m³ y 680 kg/m³.

Estos resultados concuerdan con los establecidos por la norma IRAM 9662-3 (2006) y con estudios realizados (Haselein, 2000) que afirman una relación directa entre el tamaño de los anillos de crecimiento y la densidad.

Sotomayor (2005), reporta la madera de *Pinus Pseudosttobus L.*, con un valor medio de la densidad (12 % de CH) de 647 kg.m^3 este valor es inferior al promedio encontrado en el estudio, lo cual puede explicarse que se deba un rango de edades de los árboles involucrados en el trabajo, a la procedencia de la madera para los estudios ya que esta varía de acuerdo con las propiedades que se encuentre en el subsuelo.

También reporta resultados de investigaciones llevadas a cabo sobre cuerpos de prueba pequeños y libres de defectos, contruidos con madera secada naturalmente (CH = 12 %) de la misma especie. Para el material con una densidad de 569 kg.m^3 , informa 124.2 N.mm^2 y 19163 N.mm^2 para la tensión de rotura y el módulo de elasticidad en flexión, respectivamente.

9.3 ETAPA 3

9.3.1 Diseño de piezas sólidas y combinadas

Los diseños de las cubiertas están basados en la simetría y geometría y en el sistema modular implementado por primera vez por el arquitecto le Corbusier en 1950 donde el sistema tenía que ser antropométrico, matemático y armónico, siendo el modular un sistema armónico de medidas y no de cifras como se pensaba, haciendo un uso exhaustivo de la sección aurea y de las series de Fibonacci. (Torres, 2017)

La cubierta de madera es una instalación que surge a partir de la exploración de un material como es la madera y el acero donde su manipulación y la forma en que se configura el espacio arquitectónico cuenta de una coherencia entre hacer y producir. Una estructura ligera, frágil y sinuosa, que permite tamizar la luz otorgando sombra y abrigo al espacio interior de la edificación.

Se realizó los cuadrantes de las piezas de madera maciza unidas con conectores metálicos, el diseño comprende dos longitudes diferentes, formado cuadrantes geométricos de la estructura. En la tabla 11 e reportan las características de las piezas que son utilizadas para los ensayos mecánicos con conectores.

Tabla 11 Características del material.

Características de las cubiertas				
Cubierta	Especie	Medidas (cm)		
		Ancho	Alto	Longitud
1	<i>Pinus Pseudostrobus L.</i>	5	4	80

En la fig. 67-68 se muestra las probetas de madera que fueron ensayadas con el conector metálico, al igual que su dimensionamiento.

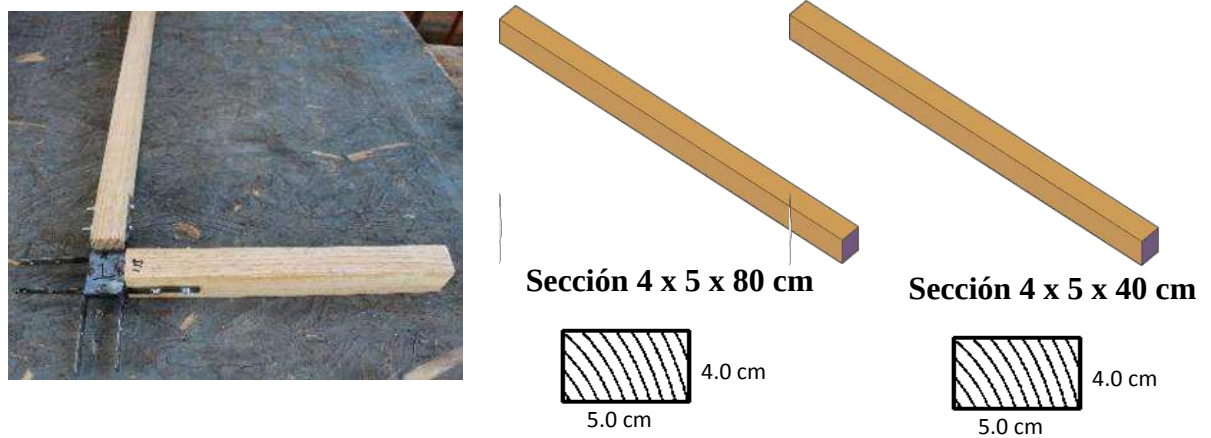


Figura 67 a) Pieza estructural de madera maciza armadas con conector metálico,
b) Secciones y longitudes de piezas usados en la cubierta

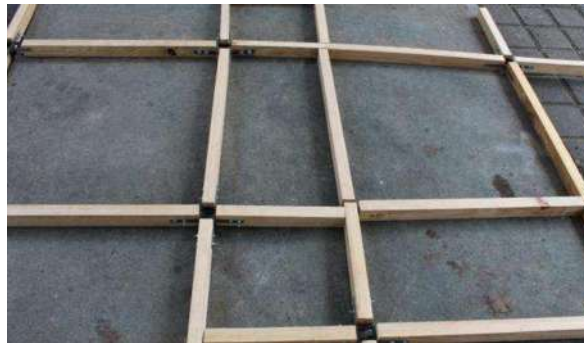


Figura 68 Ensamble de las retículas de piezas solidas de madera con conector metálico.

Los elementos metálicos empleados para este caso lo conocemos como conectores en forma de cruceta griega con dimensiones de 10 cm para cada cara de la cruceta, empleando también tornillos 2.5 pulgadas, pero seguimos conservando nuestra forma básica de pieza de madera.

Las estructuras de madera demuestran un buen comportamiento sísmico, debido a su ligereza y fuerza de inercia. Otro factor es el que se atribuye a los movimientos locales en la estructura por las uniones como clavos y tornillos lo que hace que las fuerzas que se dirigen a la estructura se minoricen (Meli, 1991).

Los daños que se han presentado en la mayoría de las estructuras de madera se deben a que son expuestas a la intemperie sin protegerlas para la humedad y el ataque de insectos, una de las soluciones que se han dado es por medio de la preservación por el método de vacío - presión vacío, impregnadas con sales C.C.A.

Para este caso se realizó un presupuesto dando una aproximación del costo de la pieza de madera solida con el conector metálico para implementarla en este último diseño, considerando la mano de obra y maquinaria utilizada para el transporte de la estructura tabla 12.

NOTA: el costo del material está elaborado por partidas y por el costo de una sola pieza estructural, en caso de que se tenga una medida exacta a cubrir, solo se multiplicaría el número de piezas por el costo de precios unitario, sin perder de vista la actualización los precios que correspondientes.

Tabla 12 ficha de costos de la pieza de madera con conector

Partidas	Cantidad	P.U (\$/pza.)	Importe \$
Material			
Pie tabla	1 tablón	183	183
Conectores	2	50	100
Impregnación de CCA	3	1	3
		Costo de pieza	286
Mano de obra			
Mano de obra	1 día	350	350
Equipo			
Renta de grua	1	950	950
Renta de andamios	1	1800	1800
		Costo maquinaria	2750
Gastos indirectos		10%	

Los resultados que se obtuvieron en el ensayo de las probetas con conector metálico a flexo compresión se ven muy irregulares como se observan en la fig. 70 para piezas de madera de 40 cm de longitud, se debe a un 70% fallo el conector metálico en el área de la soldadura y un 30% presento fallos en la pieza de madera por la inclinación del hilo y grano, dichas fallas son de tensión simple, tensión en sentido longitudinal y de tensión astillada fig. 69.

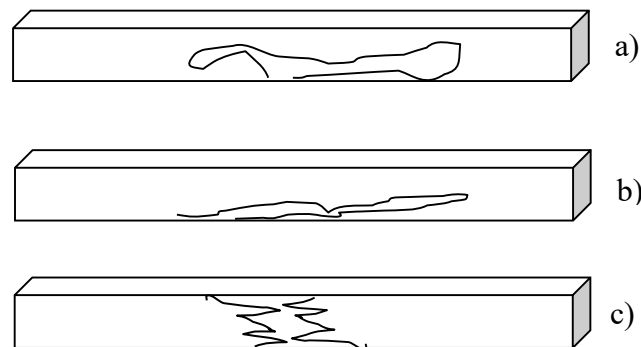


Figura 69 Tipos de falla en flexión estática: a) Falla de tensión simple, b) falla de tensión en sentido del hilo (fibras), c) falla de tensión astillada.

En la fig. 70 se muestra pruebas realizadas a flexión estática en piezas de madera con conector metálico para longitudes de 40 cm.

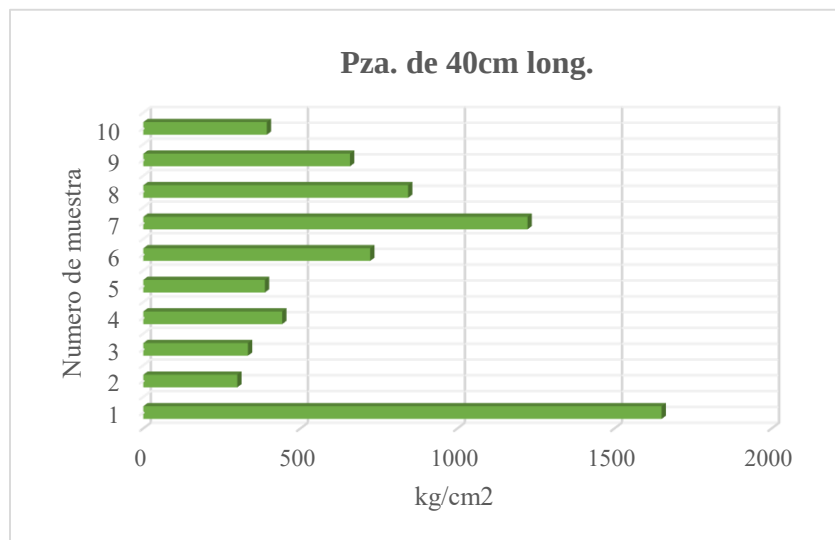


Figura 70 Pruebas relacionadas a flexión estática con conector metálico.

Para la pieza de 80 cm de longitud con conector metálico a flexo compresión se ven muy irregulares como se observan en la fig. 71, se debe a un 60% falló el conector metálico en el área de la soldadura y un 40% presento fallos en la pieza de madera por la inclinación del hilo y grano, dichas fallas son de tensión simple, tensión en sentido longitudinal y de tensión astillada

En la fig. 71 se muestra las pruebas realizadas a flexión estática a piezas de madera con conector metálico, para una longitud de 80 cm.

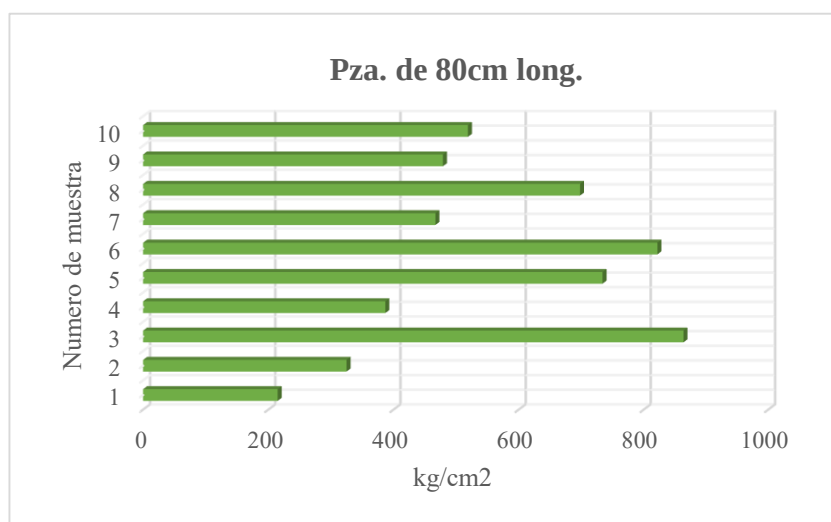


Figura 71 Pruebas relacionadas a flexión estática con conector metálico.

El análisis de varianza para carga da un valor de F calculada de 13.65 con una probabilidad de 0.020 y un valor critico de 7.708 por lo tanto, se dice que no existe una diferencia significativa entre los grupos para la variable de carga.

El diagrama de cajas mostrado en la fig. 72 se comparan los resultados de las diferentes cargas en las 2 variantes, separando en 2 grupos, el primero consta para las piezas con longitud de 40 cm y un segundo grupo para las piezas con longitud de 80 cm.

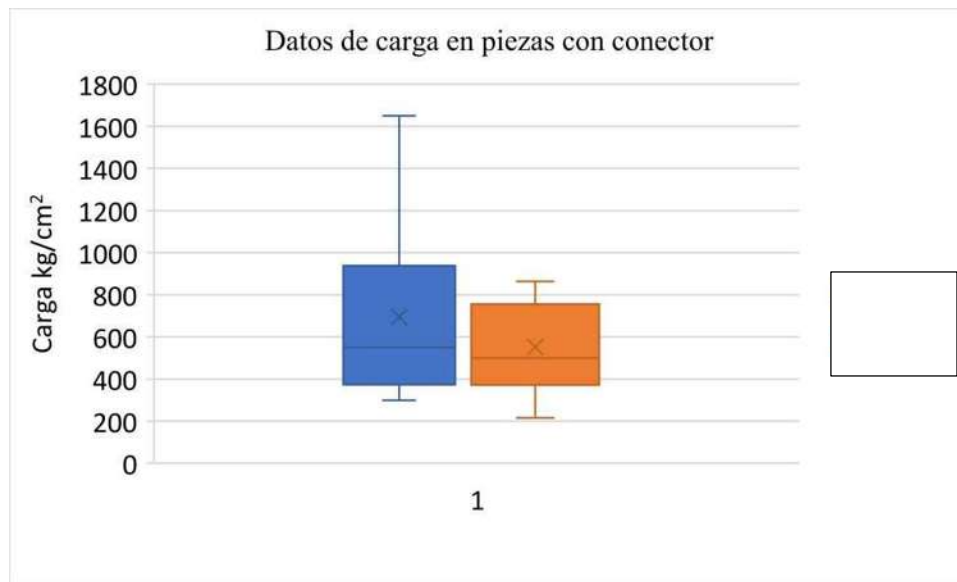


Figura 72 Diagrama de cajas y bigotes para la variable de carga en piezas con conector.

10 CONCLUSIONES

Etapas 1

En esta etapa se desarrollaron cuatro tratamientos analizados el de mejor comportamiento y resultado fue el tratamiento cuatro compuestos de madera-malla metálica-madera con una dimensión de 2.5 x 3.5 x 67.5 cm con una carga soportada de 750 kg, con una densidad de 0.529 kg/cm³ y un MOR de 193.86 kg/cm².

La madera es utilizada como material principal para la elaboración de los prototipos de estructuras de madera, y por ello se analizó de diferentes maneras como las piezas de madera sólida y madera compuesta para tener un previo conocimiento de cómo implementar el material en los diversos diseños arquitectónicos realizados con esta materia prima.

Etapas 2

Se realizó un estudio de cuatro variantes donde el mejor tratamiento fue el T-2 madera sólida con una dimensión de 4 x 5 x 35 cm con una densidad de 590.94 kg/cm², un MOR de 1704.93 kg/cm² y un MOE de 198,798.2 kg/cm²

Al ser estudiados estadísticamente se observó que existe diferencia significativa entre las variantes puesto que los tratamientos y dimensiones de cada tratamiento de probetas son diferentes al igual que las dimensiones y factores principales como la densidad.

Los valores medios de la densidad, módulo de ruptura MOR, módulo de elasticidad MOE se alcanzaron resultados altos lo cual confirman el comportamiento mecánico de la especie estudiada en este trabajo.

Una segunda opción son las probetas con clave T4-d, debido a su comportamiento las probetas tienen en su interior el alma de metal, permitiendo que la pieza estructural no colapse en un solo punto, sino que tiene la peculiaridad de fallar por secciones en un tiempo más lento y hacer un colapso por partes incrementando el tiempo de colapso al aplicar fuerza adicional fig. 73.

10.1 PROBETAS CON CLAVE TB-D

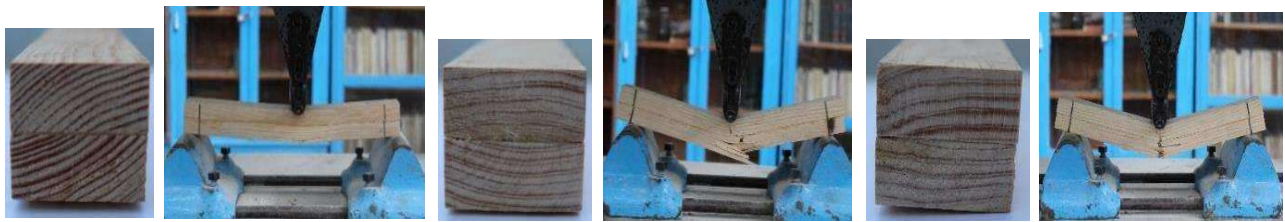


Figura 73 probetas de madera con clave TB-d ensayadas en la maquina universal

En ambos casos la densidad es un factor de suma importancia, así como el acomodo de las piezas para evitar torceduras y lograr que soporten el esfuerzo a el que estarán sometidas, la dirección de los anillos de crecimiento es otro factor al momento de unir dos piezas creando este una especie de amortiguador al momento de recibir una carga puntual o uniformemente distribuida, para este caso se analizó en carga puntual.

Para la adherencia de las piezas solidas la resina epoxcia utilizada no es viable para este tipo de ensambles pese al uso de catalizador fue imposible lograr la unión entre piezas de madera mucho menos con un metal.

Por otro lado, el pegamento a base de acetato de polivinilo resulto sumamente efectivo para en estas pruebas realizadas mecánicamente solo fue necesario calentarlo para que tuviera una mejor adherencia entre la madera y metal, sin llegar a la cristalización de la madera ni del pegamento.

Se comprobó que el pegamento debe tener una menor viscosidad para poder ser penetrado en la estructura de la madera, notándose una mejor adherencia al aplicar calor en la máquina de prensado.

En el caso de los metales propuestos en la investigación como una mejora de piezas estructurales el que dio mejor resultado desde su adherencia entre piezas hasta la parte mecánica fue la malla metálica y la lámina galvanizada.

Etapas 3

Para este caso se ensayaron las piezas individuales de las dos medietes que se tiene las cuales son de 40 y 80 cm de longitud, probando la resistencia a flexión estática, donde se demostró que la falla más recurrente es en el conector por el tipo de soldadura con el que se elaboró. En las pruebas del cuadrante completo pasa el mismo efecto el conector tiende a fallar mientras que las piezas resultan intactas al momento de aplicar la fuerza determinada por la máquina universal.

En el capítulo de anexos se muestra datos realizados por medio de cortes histológicos y de disociado empleando la microscopía con las fibras analizadas donde se determinaron que la pared celular, el lumen y la longitud de fibra presentaron características similares a las ya reportadas en coníferas, para el caso de las longitudes de fibra se obtuvieron mediciones de 700 μm rebasando la medida máxima reportada de 600 μm .

Para los valores generados de las pruebas coeficiente de rigidez, coeficiente de flexibilidad y de la relación de Runkel, se determinó que dichos valores entran en el rango de los parámetros establecidos en los estudios reportados.

También se pudo observar en los cortes histológicos y en las imágenes del microscopio electrónico de barrido como se encuentra estructurada la madera desde su interior como un material biológico, al igual que elementos que solo encontramos en la madera de pino.

Todo el estudio anatómico y mecánico, es para entender las propiedades generales del material como es la madera, para este caso está destinada a la implementación de la construcción en las estructuras de madera, siendo un trabajo pionero en esta área porque en México no se encontró un estudio similar, dicha investigación queda con diferentes líneas en las cuales se puede abordar con investigaciones futuras para la complementación de las estructuras de madera en especial con esta especie estudiada conjugando las partes tecnológica científica con la parte funcional.

11 RECOMENDACIONES

El comportamiento mecánico de la especie analizada es congruente con el esperado y puede considerarse adecuado para su uso en la industria de la construcción. La comparación de los resultados obtenidos con los reportados es una importante referencia por su desarrollo actual y su potencialidad futura en el mercado nacional de manera estructural, dando uso en estructuras de madera y una mejora en las piezas estructurales de acuerdo con los espacios donde sean destinadas.

- Hacer una buena selección de materia prima donde se encuentre libre de defectos como son los nudos fijos y nudos sueltos, las pudriciones creadas por la humedad, alabeos, torceduras, que se encuentren libre de ataque de insectos como las termitas, por estética libres de la mancha azul o hongo azul, número de anillos de crecimiento.
- Se recomienda hacer un estudio de desprendimiento del material usando la humedad o alguna otra técnica, ya que por fines de tiempos fue imposible llegar a ese punto.
- Elaborar ensayos con probetas de secciones diferentes a las realizadas en este estudio e ir incrementando la sección, así como la longitud hasta llegar a una medida de viga comercial.

Aumentar el número de capas de las piezas adheridas con pegamento y analizar el comportamiento tomando en cuenta la dirección de los anillos de crecimiento, así como el ángulo de inclinación fig. 74.

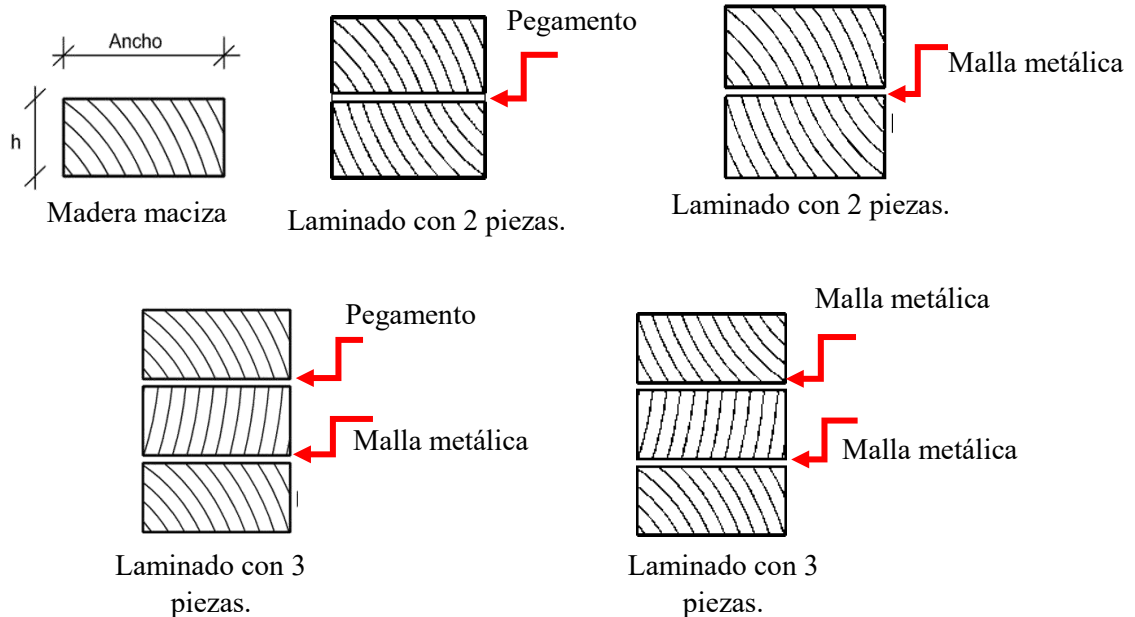


Figura 74 propuesta para continuar con el número de capas

- Hacer pruebas de fuego con las probetas adheridas con pegamento y las piezas compuestas con alma metálica, para analizar el comportamiento que se tiene al aplicar fuego en ambos materiales completamente distintos y evaluar la dilatación.

11.1 ETAPA 2

- Hacer un diagnóstico detallado del edificio donde se implemente estructuras de este tipo para el caso de los edificios históricos, revisar las condiciones en las que se encuentran los muros, la bóveda franciscana y las vigas que soportan la carga de los techos, consideran factores de humedad, los movimientos que sufre este tipo de edificaciones, comparado con los edificios modernos su comportamiento es diferentes por el método constructivo y los materiales usados para cada uno de los casos.

- Para el caso de los edificios contruidos con materiales modernos como el concreto, acero y vidrio se tendrá que revisar la zona donde será apoyada la estructura, en caso de ser construcción nueva contemplando estructuras de madera será necesario diseñar espacialmente de manera estratégica para hacer la integración de los materiales con la estructura; considerando factores de humedad, temperatura, vientos dominantes, precipitación pluvial, inclinación del sol durante todo el año, siendo componentes predeterminantes al momento del diseño.

En el apartado de anexos se presenta datos respecto a la ciudad de Morelia considerando los puntos mencionados.

- Preservar las piezas estructurales de madera por el método de presión y vacío, a una proporción de 100% de impregnación en las paredes celulares de la madera, este tratamiento deberá ser para maderas expuestas a la intemperie, porque reduce cambios dimensionales provocados por la humedad, además por ser arsénico y cobre actúa como fungicida para los insectos que dañan la madera como son termitas y hongos por mencionar algunos. Con este tratamiento la madera se garantiza hasta treinta años de vida útil.
- Para la elaboración de conectores se considera usar soldadura industrial y de preferencia hacer conectores de acero inoxidable o conectores galvanizados con diseños óptimos para ser usados en las estructuras de madera.
- Hacer uso de un calibre mayor en el acero para la elaboración de conectores, así como un diseño de acuerdo con el uso y esfuerzo al que será sometido.
- Para el caso de las estructuras de madera se recomienda hacer uso de tensores para prolongar y garantizar su vida útil, uno de los factores que disminuye es la gravedad, de acuerdo con las leyes básicas de física todo objeto tiende a caer en un espacio.
- Hacer pruebas de sismos con las estructuras de madera para evaluar su comportamiento mecánico en conjunto con las piezas y con los conectores que se implementen considerando las pijas, tornillos y el factor de carga viva y carga muerta.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. Badidi Boudas, S. L. A. B., 2003. Grain Size influence on ultrasonic velocities and attenuation. *NDT&E International*, Volumen 36, pp. 1-5.

Ambrose, J., 1998. *Análisis y diseño de estructuras*. México, D.F.: LIMUSA Noriega.

Ambrose, J., 1998. *Analisis y diseño de estructuras*. Segunda ed. México D.F.: Limusa S.A. de C.V..

Anon., 1986 b. *Standard Metods for Establishig Strctural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumer*. Philadelphia, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.

Anon., s.f. *Los apuntes: el libro de un texto*. [En línea] Available at: https://mx.images.search.yahoo.com/yhs/search;_ [Último acceso: 13 05 2016].

Aragua, R. A. V., 2003. *Diseño y ensayo de uniones para cerchas de madera*, Chile : [tesis maestría] Universidad Autral de Chile, Facultad de Ciencias de la ingeniería .

Architects, H., 2016. *Hopkins Architects Partnership LLP*. [En línea] Available at: <http://www.hopkins.co.uk/projects/5/100/> [Último acceso: 05 06 2016].

Arriaga, F. G. L. G. K. G. y. P. ., 1992. Evaluación de la capacidad portante de forjados antiguos con vigas de madera. *AITIM*, Issue 161, pp. 51-62.

Barajas M.J., E.-M. R. C. V. T., 1981. *Estructuras e Identificación, La Madera y sus Usos en la Construcción*. Xalapa, Veracruz: LACITEMA-INIREB.

Barricuelo LEG, F. C. G. I. B. C., 1983. Basic density and characterists of eucalyptus grandis wood fibers. *3° Latin american cellulose and papers congress*.

Barroso, J., s.f. *cadamda camara de la madera*. [En línea] Available at: http://www.cadamda.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=465&Itemid=81 [Último acceso: 13 12 2015].

Bergman, R. y. S. R., 1958. Effect of statically applied stresses on the velocity of propagation of ultrasonic waves. *Journal of applied physics*, Volumen 29.

Berumen, A. D., 2010. *Estática "El blog en Equilibrio"*. [En línea] Available at: <http://estatica31.blogspot.mx/2010/11/momento-flector.html> [Último acceso: 16 02 2018].

Blogs, A., s.f. *La conservación de estructuras de madera en el patrimonio histórico y arquitectónico*. [En línea].

Bonilla, J. A. T., 2004. Consideraciones que deben tenerse en cuenta para la restauración arquitectónica. *conserva*, Issue 8, p. 22.

Cabezas, C., 2013. *Arch daily*. [En línea] Available at: <http://www.archdaily.mx/mx/02-306197/conoce-el-diseno-de-cristian-undurraga-para-el-pabellon-de-chile-en-la-expo-milan-2015> [Último acceso: 2016 01 25].

Calvache, J. E., 2008. [En línea] Available at: <http://calvachemaderblog.blogspot.mx/> [Último acceso: 7 enero 2018].

Ceron, 1999. Norma de Clasificación Visual para Maderas Latifoladas de uso Estructural. *Boletín Académico n. 22 Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*.

Chan, O. A. M. M. A. G., 2002. Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería*, 6(1), pp. 29-38.

Clavijo, J., 2013. Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 1(3), p. 14.

COFAN, 1999. *Comisión Forestal de América del norte, manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. Segunda ed. México D.F.: COMACO.

Contreras, W. M. e. a., 2007. determinación de los esfuerzos de diseño de vigas laminadas de pino caribe (*pinus caribaea* var. *hondurensis*) encoladas con adhesivo de isocianato (mdi).. *Madera: Ciencia y tecnología* 9(3), pp. 285-298.

Council, A. H. E., 2006. *madera de frondosas estadounidenses para el uso estructural*. [En línea] Available at: http://www.upm.es/observatorio/vi/index.jsp?pageac=actividad.jsp&id_actividad=63254 [Último acceso: 05 06 2016].

Dann, L. J., 2010. *Las memorias de Leonarado Da Vinci*. Florencia : La factoria de ideas .

Díaz, V., 1998. Propiedades tecnologicas de la madera y su aplicacion. *Memoria del V seminario Nacional de la Industria Maderera. Publicaciones del INIFAP*, pp. 99-119.

Díaz, V. O. C. D., 1986. Mecánica de la Madera. *Publicación Docente*, Issue 23, p. Chile.

dinamo, E., 2015. *El dinamo*. [En línea] Available at: <http://www.eldinamo.cl/ambiente/2015/10/09/premian-al-pabellon-de-chile-con-tres-galardones-en-concurso-de-sustentabilidad-en-expo-milan/> [Último acceso: 09 01 2016].

Echenique Manrique R., R. F., 1993. Mecanica de la madera. *Textos Universitarios*.

Erik Baradit, P. N. A. F.-P., 2013. *Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido*. [En línea].

Estructural, M. d. C. V. p. M., 1984. *PADT-REFORT*. Cartagena : Grupo Andino, Junta del Acuerdo de Cartagena.

Etherington., R., 2010. *de zeen magazine*. [En línea] Available at: <http://www.dezeen.com/2010/02/17/centre-pompidou-metz-by-shigeru-ban/> [Último acceso: 22 01 2016].

Fank, P. 2014. Resistencia y rigidez de tablas destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Análisis comparativo entre el pino resinoso (*Pinus taeda/elliottii*) y el álamo (*Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ y ‘Stoneville 67’). *ResearchGate*,, p. 9.

FAO, 1953. raw materials for more paper. *Forestry and forest products*, p. 6.

Fernández, E. R. y. F., 1991. *Estructuras de madera*. Primera ed. México: Limusa S.A. de C.V.

Fernández, E. R. y. F., 1991. *Estructuras de madera*.. 3 reimpresión ed. Balderas México: Limusa S. A.

Gilbert, V., Lazcano, R., Martin, F. & Vall-llosera, E., 1997. *Trabajos de madera*. Primera ed. España: Parramon S.A..

Gloss P., 1995b. Strength grading. timber engineering. basis of design material properties structural components and joints. *Centrum hout*, pp. A6/1-A6/8.

Guridi , G. L. I., 1998. *Anatomía de la madera, Instructivos . Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera*. Morelia, Mexico: Edición libre.

Hanbook, W., 2010. *Wood as an Engineering Material*. Centennial ed. Wisconsin: s.n.

Harry, M. P., 1991. *Diseño simplificado de armadura de techo para arquitectos y constructores*. Primera ed. Mexico D.F.: Limusa S.A. de C.V..

Haselein C.R., C. E. E. J. D. A., 2000. Características estructurales de madera de pinus elliot. *Revista de ciencia forestal* vol. 10, 2 , p. 30.

Herrero, M. E., 2003. *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*, Madrid: s.n.

Hunt M. G., G. A. G., 1962. *Wood preservation*. primera ed. barcelona: salvat editores.

Smith, Ian A. A. a. M. S., 2006. *Design Method for Connections in Engineered*, Canada: Faculty of Forestry and Environmental Management.

Igartua et. al., D. e., 2000. Calidad de leño en eucalyptus globulus ssp, variación de la densidad básica y la longitud de fibra en una estación del sureste de la provincia de Buenos Aires. *Congreso iberoamericano de investigación en celulosa y papel*.

INEGI, s.f. *Localización Geográfica*. [En línea] Available at:

www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem04/info/mic/.../c16053

[Último acceso: 17 01 2016].

Jiménez, B. J., s.f. Teoría de la adhesión. *Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales Ingeniaritza Mekanikoa, Energetikoa eta Materialeen Saila*.

Moglia Juana Graciela, A. M. G. S. B., s.f. *Macroscopía de la madera*, Santiago estero, Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales.

Katalin Kránitz, M. D. P. N., 2013. Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *RILEM*.

Kollmann, F., 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*.. Madrid: Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y el Servicio de la Madera de Agricultura..

Lea, P. J. R., 2011. *Diseño de Estructuras de Madera*. Buenos Aires : Nueva librería .

M., A. M. M., s.f. *Resistencia de Materiales Aplicada*. Yucatán Hermosa: Yucatán Hermosa.

madera, A. B. >. S. d. C. B. >. m., s.f. *Patologías de la madera y su tratamiento*. [En línea].

Madera, M. d. C. V. p., 1984. *PADT-REFORT*. Cartagena: Grupo Andino, Junta del Acuerdo de Cartagena.

madera, o. i. d., 2010. *Planta de tratamiento C.C.A.*. [En línea] Available at: <http://www.oxipal.com/index-2.html> [Último acceso: 17 03 2016].

Madrid, M., s.f. *Tecnología de la Adhesión*. España: s.n.

Mario H. Chan Martín, O. A. M. M. A. G., 2002. Los defectos naturales en la madera aserrada. *Ingeniería* , 6(1), pp. 29-38.

Martínez, M., 1948. *Los pinos Mexicanos*. Mexico : segunda .

Miguel, H. e., 2003. *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera*.,

Madrid, España: [tesis doctoral] Universidad Politecnica superior de ingenieros de montes.

Moglia, A. M. G. S. B., 2007. *Macroscopía de la madera*, Santiago estero, Argentina: Univerisdad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales.

Mondragon VS, N., 2004. *Contribucion de la madera de lysiloma acapulcensis*. Morelia(Michoacan): s.n.

Monogrfias, s.f. *Ensayos mecanicos*. [En línea] Available at: <http://www.monografias.com/trabajos16/gmelina-arborea/gmelina-arborea.shtml> [Último acceso: 05 12 2015].

monumentos, C. i. d. s. y., 1964. *Carta internacional sobre la conservación de monumentos y sitios ..* Venecia, s.n., p. 4.

Mora, A. G., 2003. *Software para el calculo de esfuerzos en elementos a flexion de madera*, Morelia, Michoacan: [tesis de maestria] Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Facultad de Ciencias y Tecnología de la Madera.

Namoc, D. J., 2006 . *Diseño en acero y madera*. Peru : s.n.

Norte, C. C. F. d. A. d., 1999. *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. México D. F: Consejo nacional de la madera en la construcción, A. C. (COMACO).

Ordóñez C. V., D. S., 1985. *Manuel de Clasificación Visual de Madra Estructural de pino, nota técnica No. 12*, Xalapa, Veracruz: LACITEMA-INIREB.

Oregon, U. o., 2007. *UO Solar Radiation Monitoring Laboratory*. [En línea] Available at: <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html> [Último acceso: 27 11 2015].

Ortega E., F. L. G. O. T. C. V. y. C. C. N., 1988. Anatomia de la madera de veintiocho especies de cosautaln de carvajar. *Boletin tecnico de la madera y su uso* , p. 206.

Padilla G., H., 1982. *Glosario practico de terminos forestales*. Mexico: Limusa.

PADT-REFORT, 1984 . *Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino*. Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.

Harry Parker, A. J., 2007. *Diseño simplificado de estructuras de madera*. Segunda ed. México : Limusa wiley.

Roberto, M. P., 1991. *Manual de diseño estructural*. Mexico: 1 ediciones ciencias y tecnica.

Robles F-V.F., E.-. M. R., 1983. *Estrcturas de Madera*,. 1 ed. México, D.F.: Limusa.

Sanchez E., 1971. Caraacteristicas de las diferentes pulpas y su influencia en las propiedades del papel. *ATCP Mexico*, pp. 26-34.

Sanjuan Dueñas, R., 1997. *Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel*.. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

Sargiotti, R., 2010. Estrcuturas reciprocas. *Arquitectura y tecnología*.

Sasaki, Y. y. A. K., 1998. Acoustoelastic phenomena of wood. *Proceeding of 5 th World conference on timber engineering*, agosto, Volumen 2, pp. 296-303.

Sika, 2011. Adhesivos en la construcción y reparacion en estructuras. *Presupuesto y construcción*, Issue 51, p. 22.

Sites, I. C. o. M. a., 1999. *Principios que debe regir la Conservacion de las Estructuras Historicas en Madera*. [En línea].

Sotomayor Castellanos. J.R., R. P., 2014. Anisotropia del modulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de Pinus michoacana, Pinus douglasiana y Pinus pringlei. *Acta univeristaria*, 24(5), pp. 3-12.

Sotomayor Castellanos, J. R., 2008. *Tabla FITECMA de clasificacion de caracteristicas mecanicas de maderas mexicanas*, Morelia, Michoacan,Mexico: 2 edicion.

Téllez-Sánchez¹, C., Herrera-Ferreya², M. A. & Rutiaga-Quñones², J. G., 2009. Anatomía, física y mecánica. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 15-21, pp. 15(1): 15-21.

Tomasz Ozyhart, S. H. S. J. S. P. N., 2012. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Springer*.

Tomé, J. M., 2010. *Biografía y obra de andrea palladio*. [En línea] Available at: <http://www.arteespana.com/andreapalladio.htm> [Último acceso: 27 12 2015].

Torres, R. S., 2017. *scribd*. [En línea] Available at: <https://es.scribd.com/doc/95772255/7-Teorias-de-la-Proporcion-ultrasound>, M. o. e. c., 2001. s.l.: s.n.

UNESCO, s.f. *Organizacion de naciones unidas para la educación, ciencia y cultura*. [En línea] Available at: http://portal.unesco.org/es/ev.php-url_id=45692&url_do=do_topic&url_section=201.html [Último acceso: 25 12 2015].

Vanesa Baño (1) (P), C. M. (. A. V. (. D. G. (. y. L. M., 2017. *fabricación de un prototipo de puente vehicular a partir. clem+ cimad*, p. 12.

Villagomez, M. d. l. L. Z., 2008. *Modelacion de armaduras de madera por el metodo de los elementos finitos*. Morelia Michoacan : s.n.

Villaseñor Araiza, J. G. R. Q., 2000. La madera de Casuarina equisetifolia L.. *Madera y Bosques* 6(1), pp. 29 - 40.

Vishwa N.P. Mathur, E. T., 1995. *Diseño para servir*. [En línea] Available at: ww1.inecol.edu.mx/myb/.../Mathur%20y%20temprano%201995.pdf de VNP Mathur - 1995 [Último acceso: 16 12 2016].

W. Chen, Y. L. P. S. Z. S., 2013. Microstructural developmet of hydrating portland cement paste at early ages investigated with non-destructive methodds and numerical simulation. *Journal of nondestructive evaluation*, Volumen 32, pp. 228-237.

Moisés Aguilar-Alcántara. Anatomía de la madera de doce especies de un bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México. *Revista madera y bosques* 2014 vol. 20, 3

Haselein C.R., C. E. Características estructurales de madera. Revista de ciencia forestal, (2000). vol. 10, 2, p. 30.

Guridi, G. L. Anatomía de la madera, Instructivos, Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. (1998) Morelia, México: Edición libre.

Larios S., S.P., J. Huerta C. y C.H. Ramos A. 1979. Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel en Zoquiapan, Méx. Chapingo, Nueva Época, No. 20, Nov.-Dic. 3-8.

Petroff, G. y D. Normand. 1968. The correlation between the physical and mechanical properties of paper, and dimensional characteristics of paper, from tropical hardwoods. Pulp and paper development in Africa and the Near East. FAO I: 269-287.

Porres, C. y J. Valladares. 1979. Producción de pulpa y papel con materias primas autóctonas centroamericanas. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial. Guatemala. 72 p.

Tamarit U., J.C. 1996. Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. Madera y Bosques 2(2): 29-41.

Abrahán Cabudivo Moena. Características generales, organolépticas, macroscópicas y estructura microscópica de la madera de coníferas y latifoliadas. Departamento académico de industrias y productos forestales. Iquitos- Peru 2010

Giménez Ana María Anatomía de la madera (2005) Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales Catedra de Dendrología. Segunda edición.

.

13 ANEXOS

Tabla 13 Análisis de contexto

ANÁLISIS DE CUBIERTAS EN EDIFICACIONES COLONIALES.				
Ubicación	Imagen de cubiertas	Tipo de Material	Diseño de estructura	Condiciones
Miguel Silva #55 en el centro de Morelia Michoacán		Tubulares de acero. Policarbonato.	Semi-circular	Policarbonato en con un deterioro alto.
Miguel Silva col. centro de Morelia Michoacán		Estructura de PTR. Cubierta con placas de vidrio.	Figura geométrica cuadro a desnivel.	Vidrio sin mantenimiento
		Estructura tubular. Policarbonato	Semi curvo	Policarbonato Estructura metálica
		Estructura tubular. Panel solar. Lámina galvanizada	Cubierta con inclinación	Deterioro en láminas y perfiles metálicos
		Perfil tubular.	Cubierta curva	

		Estructura PTR. Cubierta de lámina galvanizada.	Cubierta curva	Deterioro en lamina y perfiles tubulares
--	---	---	----------------	---

En las visitas algunos de los edificios históricos se encontró en su totalidad el uso de materiales en cubiertas como son el acero, vidrio y policarbonato; la mayoría causando el mismo efecto al interior del edificio y con un diseño no apto, ya que no se consideran varios factores como es la orientación, clima, temperatura y vientos dominantes.

Los diseños que han sido propuestos para espacios abiertos en estas edificaciones históricas son valorados por el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), encargado de evaluar las intervenciones en estas construcciones sea de restauración o implementación de nuevos elementos arquitectónicos, debido que la postura va cambiando de acuerdo al tipo de edificio considerando, desde la ubicación, el uso que tenía en su estado original y actualmente, contexto y el diseño que se implementa tomando en cuenta las necesidades que se desarrollan en el inmueble rigiendo como eje principal el patio central existente en la arquitectura colonial.

13.1 TRATAMIENTO 1

En esta pieza la carga soportada es de 641 kg, presento falla estructural debido a un nudo en el elemento de madera que está sometido a tensión como se ve en la fig. 111 c), la probeta en su totalidad es albura, presento un aplastamiento por el acomodo de los anillos de crecimiento de las piezas ya que se encuentran en sentido horizontal, no presento desprendimiento de pegamento al momento de aplicar un esfuerzo fig. 75.

- Alma de acero inoxidable de 3 mm.
- Pegamento comercial resina epoxcia marca sayer lark.



Figura 75 a) pieza de madera compuesta con solera en ensayo mecánico, b) pieza sometida a flexión, c) falla de la pieza de madera por presencia de nudo.

Para la fabricación de esta pieza resulta un poco delicada, porque debe ser muy precisa para poder introducir el alma metálica sin obstrucciones, resulta un tanto laborioso al momento de hacer la unión entre pieza, por lo tanto, se recomienda como una alternativa de solución para el aumento de su resistencia de las piezas mecánicamente.

13.1.1 Tratamiento 2

En esta pieza 2 la carga soportada fue de 645 kg, presenta falla por la presencia de nudo fijo ubicado en toda la sección, la madera es en su totalidad es de albura con un acomodo de anillos de crecimiento en sentido vertical en elementos de madera, se demostró una mayor resistencia comparada con la muestra anterior, se reporta sin desprendimiento del pegamento a pesar de la fricción que hay al momento de aplicar esfuerzo fig. 76.

Alma de lámina galvanizada de 1 mm, perforaciones de diferentes diámetros.



Figura 76 a) pieza de madera compuesta con alma de lámina galvanizada, b) pieza sometida a flexión, c) falla de la pieza en la lámina inferior.

13.2 TRATAMIENTO 4

Una vez aplicado el esfuerzo de manera puntual a la probeta se determinó la carga soportada de 378 kg con apoyos a una separación de 60 cm. La falla se dio al centro de la pieza sin desprender el pegamento en la misma área siendo dicho desprendimiento en ambos extremos de la probeta fig. 77 Resina epoxica y catalizador, sin alma metálica.



Figura 77 a) piezas de madera solida pegadas con resina epoxica, a) pieza sometida a flexión, c) falla de la pieza.

13.3 GRUPO 2

13.3.1 Tratamiento 1

Alma de acero inoxidable

Al aplicar el esfuerzo de manera puntual soporta 500 kg presentado falla el centro de la pieza con anillo orientados de manera vertical existe ligeramente desprendimiento al centro de la probeta fig. 78.



Figura 78 a) pieza de madera compuesta con solera metálica, b) pieza sometida a flexión, c) falla de la pieza de madera.

13.3.2 Etapa 2

Como una primera aproximación se elaboraron dos estructuras de madera la primer de ellas es auto soportante haciendo uso de una sola pieza de cortas dimensiones repetida en toda la estructura, por medio de la geometría distribuye la carga de manera uniforme en toda la estructura.

Para este caso en la pieza se hicieron cuatro saques de 5cm de longitud por el ancho de la madera, dos en los extremos por el mismo lado y dos más al centro de la pieza en el sentido opuesto fig. 79.

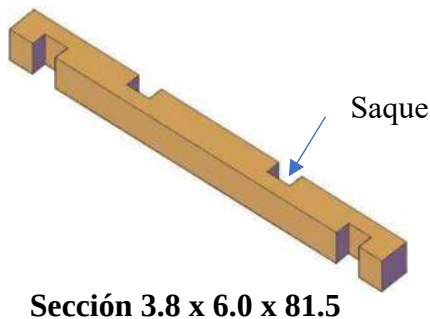


Figura 79 Pieza de madera solida con cuatro saques de 5 cm de longitud usadas para armaduras auto soportantes.

Para la segunda estructura se realizó una pieza de madera con una sección de 2.5 x 3.6 x 70 cm de longitud, se le hicieron cuatro orificios en toda la longitud de la probeta distribuidos de manera simétrica, para este caso se rige a partir de la geometría por medio de un hexágono por medio de la repetición de las formas y piezas. En este caso cada pieza es unida con remaches de acero galvanizados en forma de “L” fig. 80.

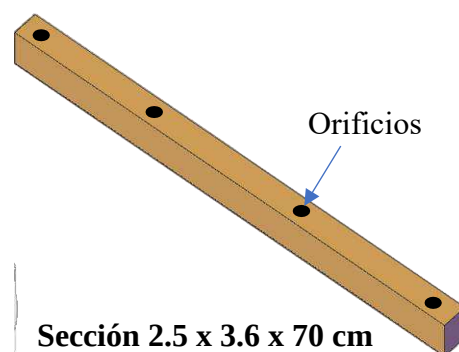


Figura 80 Pieza de madera sólida con cuatro orificios para recibir remaches de acero galvanizado.

13.3.3 Diseños de elementos de madera

13.4 PROTOTIPOS ELABORADOS

Se elaboraron dos cubiertas con piezas de madera sólida con madera de pino con diferentes diseños, secciones de pieza y longitudes, cumpliendo un diseño arquitectónico estructural para cada uno de los casos. Tabla 14.

Tabla 14 características de las cubiertas

Características de las cubiertas				
Cubierta	Especie	Medidas (cm)		
		Ancho	Alto	Longitud
1	<i>Pinus Pseudostrobus L.</i>	6	4	80
2	<i>P. pseudostrobus</i>	3.6	2.5	70

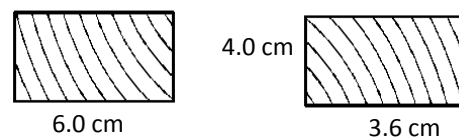
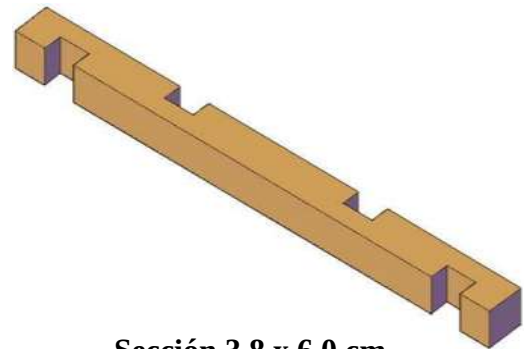


Figura 81 Sección de piezas

13.4.1 Descripción de elementos

- El primer diseño de cubierta está basado en los conceptos de diseño de las formas autosustentables, inspirada en las primeras obras de madera en las cuales aún no se empleaba elementos metálicos. El elemento de madera es de forma rectangular con una sección de 3 x 6 x 81.5 cm y cuenta con ciertos saques como se muestra en la fig. 82.
- La segunda propuesta se hace uso de elementos metálicos en cuatro puntos de apoyo para la mejor distribución de las cargas en las piezas favoreciendo a una mejora estética. En este caso se usa remaches elaborados con alambre galvanizado fig. 83.



Sección 3.8 x 6.0 cm

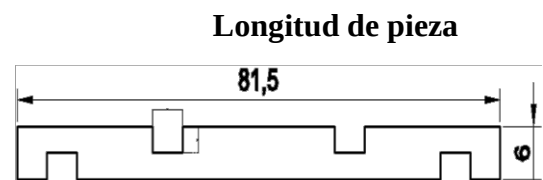
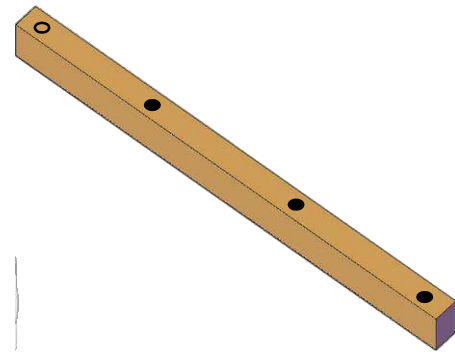


Figura 82 Cubierta de madera auto soportante utilizando como base un geométrico cuadrado: Exterior de estructura reciproca de madera de pino, b) interior de la estructura ensamble entre piezas, c) alzado en 3D de pieza de madera, d) pieza vista en 2D (plano).

a)



Sección 2.5 x 3.6 x 70 cm

b)



Longitud de pieza

d)

70 cm

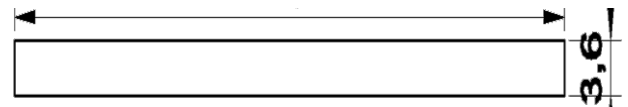


Figura 83 Cubierta de madera con grapas de galvanizado utilizando como base geométrico un hexágono:

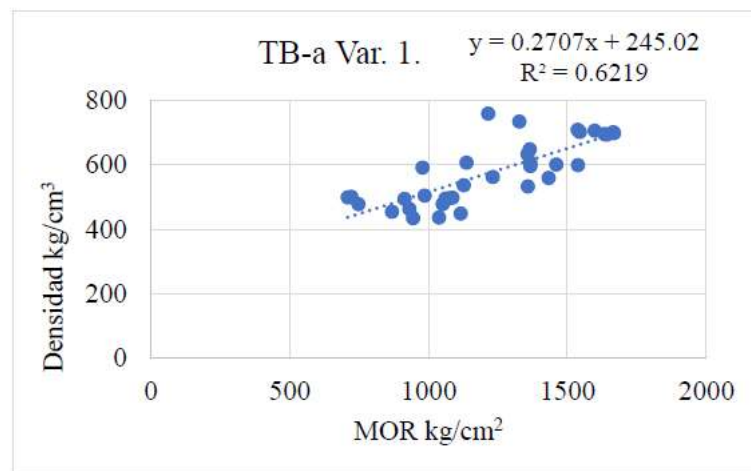
a) Exterior de estructura de madera de pino, b) interior de la estructura unión entre piezas,

c) alzado en 3D de pieza de madera, d) pieza vista en 2D (plano).

13.5 REGRESIÓN LINEAL

Tratamiento 1 madera maciza (2.5 x 5 x 35 cm)

En la fig. 84 muestra la relación entre la densidad y el módulo de ruptura MOR, el cual se obtuvo una regresión lineal con una R^2 calculada de 0.62 que indica las variaciones en el módulo de ruptura con respecto a la densidad, por lo tanto, hay una relación



directa entre estos dos factores.

Figura 84 Relación entre la densidad y el MOR para 35 cuerpos de prueba.

En la fig. 85 es una relación entre el número de anillos de crecimiento con la densidad, obteniendo una regresión lineal con una R^2 de 0.2404, se comprueba que no existe una relación directa entre las dos variantes analizadas.

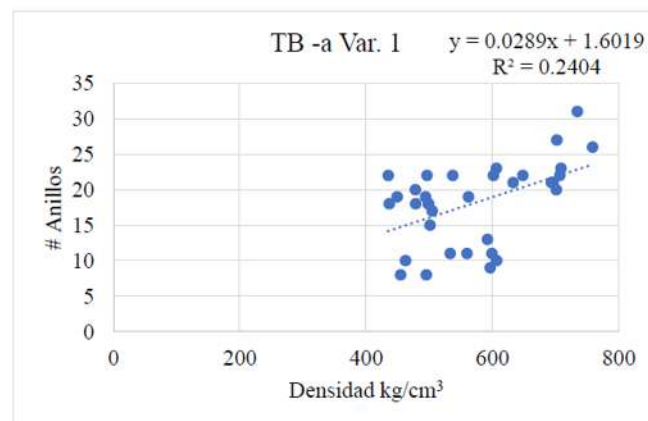


Figura 85 Relación entre número y número de anillos de crecimiento

En la fig. 86 se ve la tendencia de una regresión lineal con un R^2 de 0.1045 se demuestra que no existe una relación entre ambas variables ya que a mayor número de anillos de crecimiento no habrá un mayor módulo de ruptura.

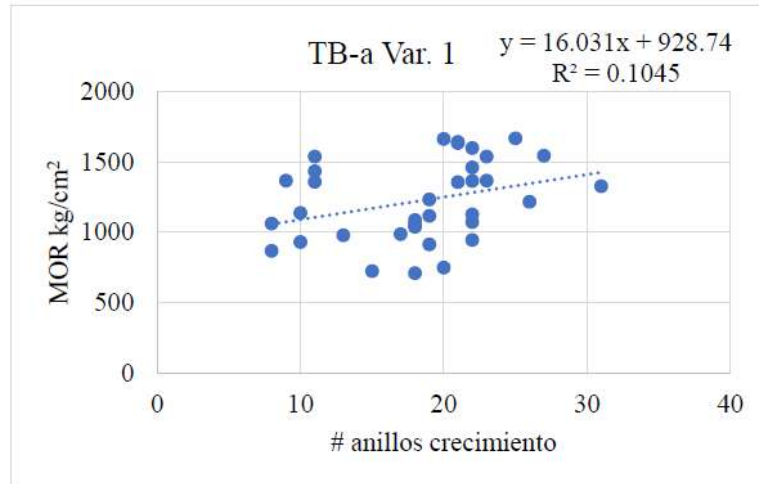


Figura 86 Relación entre MOR y número de anillos de crecimiento

En la fig. 87 se hace una regresión lineal entre las variables de carga y tiempo para corroborar el colapso que sufre una pieza estructural en un tiempo determinado aplicando una fuerza determinada

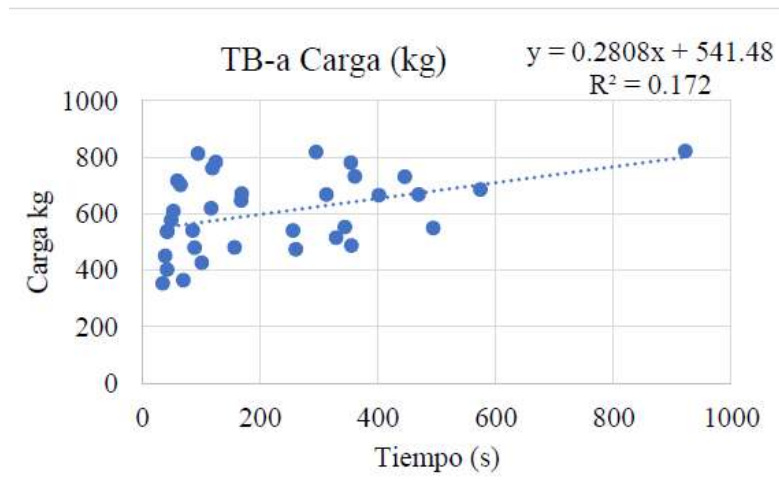


Figura 87 regresión lineal entre carga (kg) y tiempo (s)

En la fig. 88 se observa la relación entre el módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión. El valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.5875$) indica que las variaciones en el módulo de elasticidad se obtuvo el valor de 0.5875 % y la variabilidad del módulo de ruptura, por lo tanto, es una propiedad que posee un elevado valor predictivo.

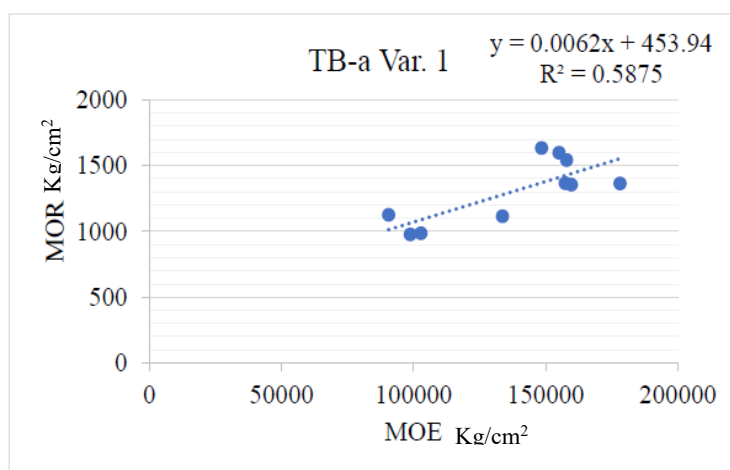


Figura 88 Relación entre el módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión.

Los valores de R^2 indican que las variaciones de la densidad explican la variabilidad de las propiedades mecánicas en porcentajes, correspondiendo el menor valor al módulo de ruptura en flexión. Estos resultados confirman que la densidad normal posee un elevado valor predictivo acerca de las propiedades mecánicas analizadas. En la fig. 89 se presenta la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad. El valor determinado de la R^2 es de 0.3843 indica las variaciones entre el módulo elástico con respecto a la densidad con un 20%.

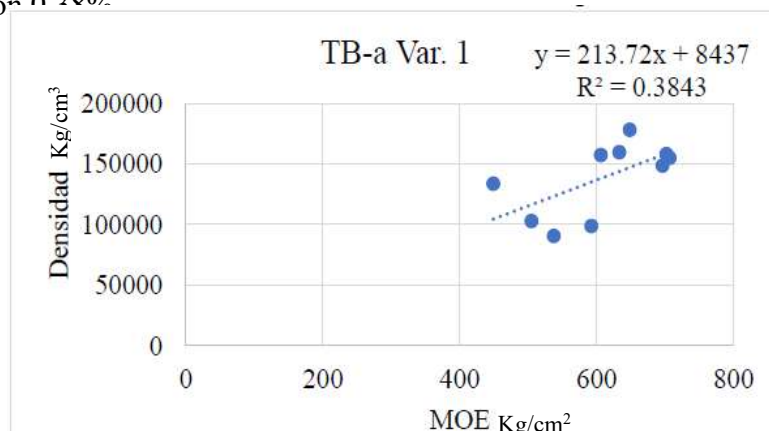


Figura 89 Regresión de modulo elástico y densidad.

El módulo de elasticidad con respecto al número de anillos de crecimiento con valor R^2 es de 0.3818 el cual indica que las variaciones del módulo de elasticidad obtenido son de un 038% de variabilidad fig. 90.

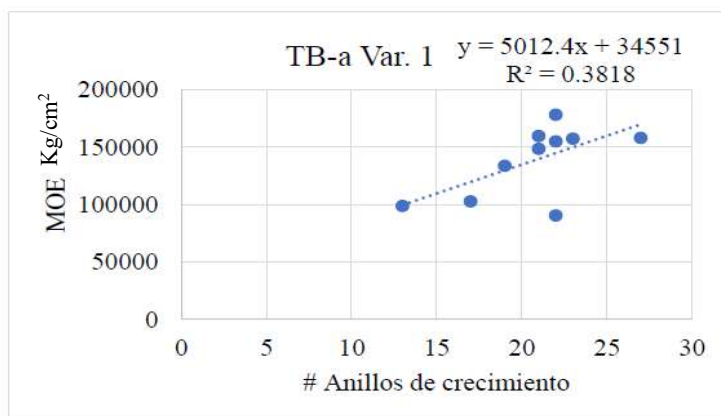


Figura 90 Regresión lineal de módulo de elasticidad y numero de anillos de crecimiento.

Los valores de R^2 indican que las variaciones de la densidad explican la variabilidad de las propiedades mecánicas en porcentajes, correspondiendo el menor porcentaje al módulo de elasticidad en flexión. Estos resultados confirman que la densidad normal posee un elevado valor predictivo acerca de las propiedades mecánicas analizadas.

Tratamiento 2 madera maciza (4 x 5 x 35 cm)

En la fig. 91 se muestra la relación entre la densidad y el módulo de ruptura MOR, del cual se obtuvo una regresión lineal con una R^2 calculada de 0.0339 que indico las variaciones en el módulo de ruptura con respecto a la densidad, por lo tanto, hay una relación directa entre estos dos factores.

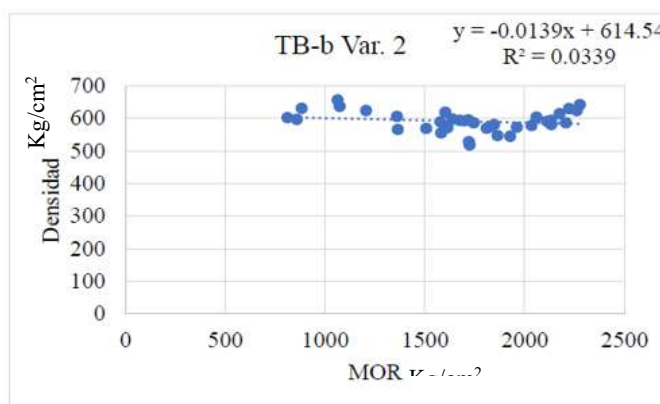


Figura 91 Regresión lineal de MOR y densidad

En la fig. 92 se observa una relación entre el número de anillos de crecimiento con respecto a la densidad, obteniendo una regresión lineal con un valor de R^2 de 0.3047, con esto se comprueba que no existe una relación directa entre las dos variantes analizadas.

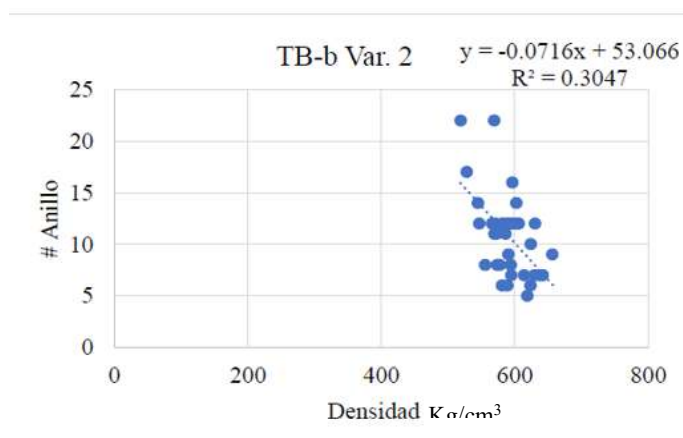


Figura 92 Regresión lineal de número anillos crecimiento y densidad.

En la fig. 93 se ve la tendencia de una regresión lineal con un valor de R^2 de 0.077 el cual demostró que no existe una relación entre ambas variables, al presentar un mayor número de anillos de crecimiento no se encontró un incremento en el módulo de ruptura.

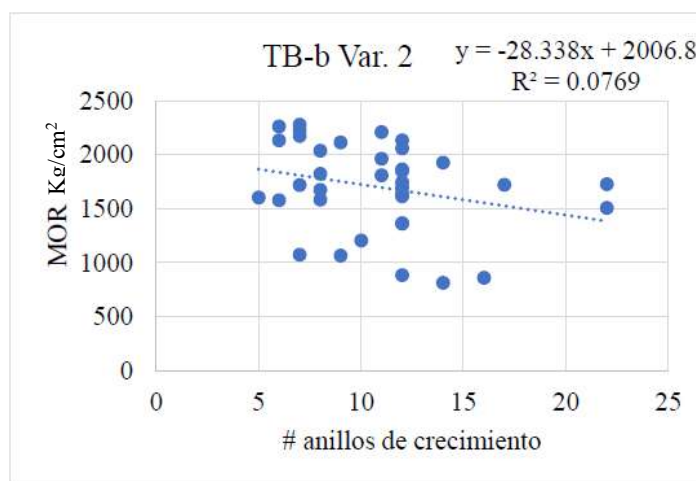


Figura 93 Regresión lineal MOR y numero de anillos de crecimiento

En la fig. 94 se hace una regresión lineal entre las variables de carga y el tiempo para corroborar el colapso que sufre una pieza estructural en un tiempo determinado, aplicando una fuerza determinada, el valor obtenido con una R^2 de 0.125.

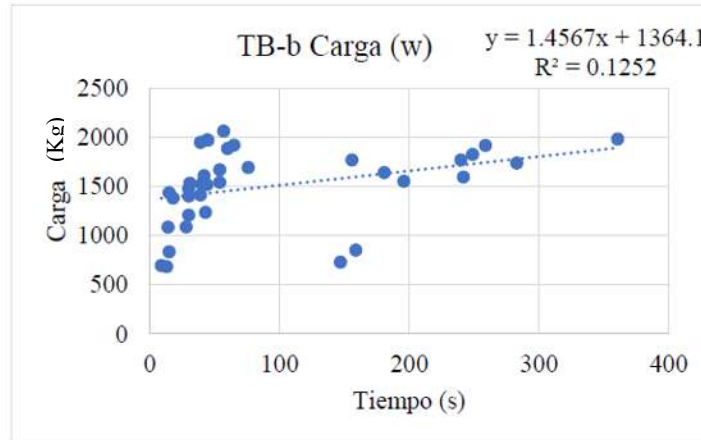


Figura 94 Regresión lineal carga y tiempo (s)

En la fig. 95 se observa la relación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión. El valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.0035$) indica que las variaciones en el módulo de elasticidad explican el 0.0035 % de la variabilidad de la resistencia en flexión y que por lo tanto aquella propiedad posee un elevado valor predictivo de esta última.

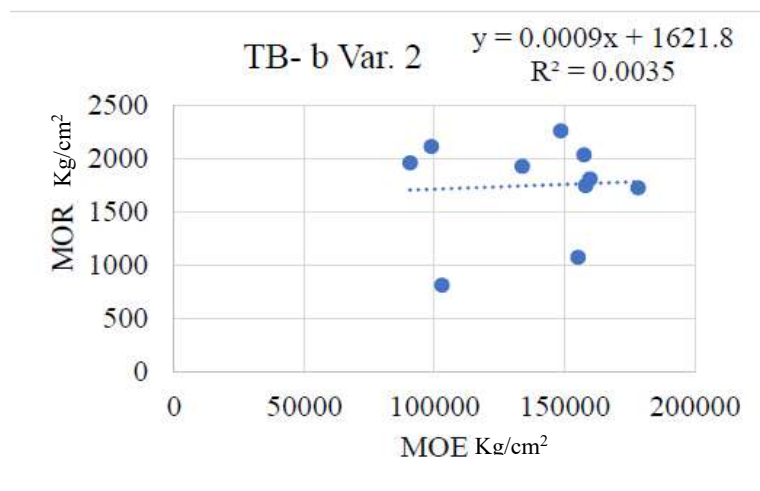


Figura 95 Relación entre el módulo de elasticidad y la tensión de rotura en flexión.

En la fig. 96 se presenta la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad. El valor determinado de la R^2 es de 0.039 indica las variaciones entre el módulo elástico con respecto a la densidad con 0.039%.

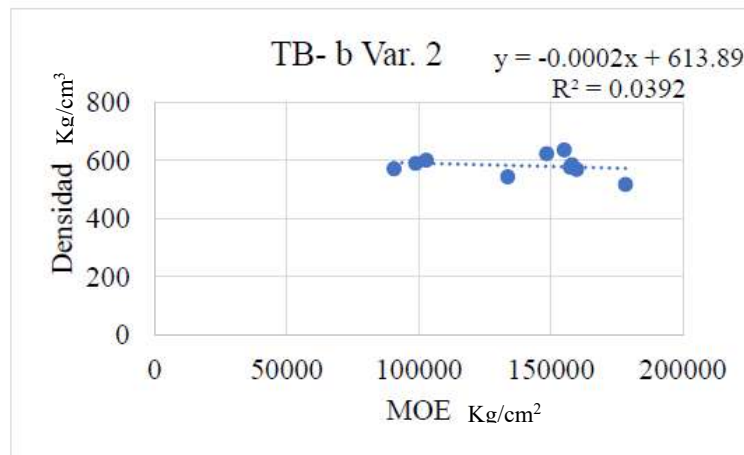


Figura 96 Regresión lineal densidad y MOE

El módulo de elasticidad con respecto al número de anillos de crecimiento con valor R^2 de 0.037 indica las variaciones del módulo de elasticidad, con un 0.037% de variabilidad fig. 97.

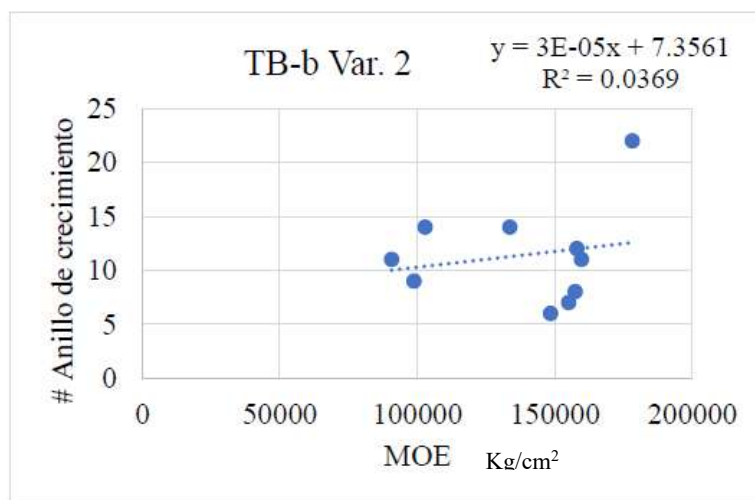


Figura 97 a) Regresión lineal MOE y numero de anillos de crecimiento, b) Probeta TB-12-b

Tratamiento 3 (Madera-madera)

En la fig. 98 se muestra la relación entre la densidad y el módulo de ruptura MOR, donde se obtuvo una regresión lineal con una R^2 calculada de 0.108 que indica las variaciones en el módulo de ruptura con respecto a la densidad, por lo tanto, no hay una relación directa entre estos dos factores.

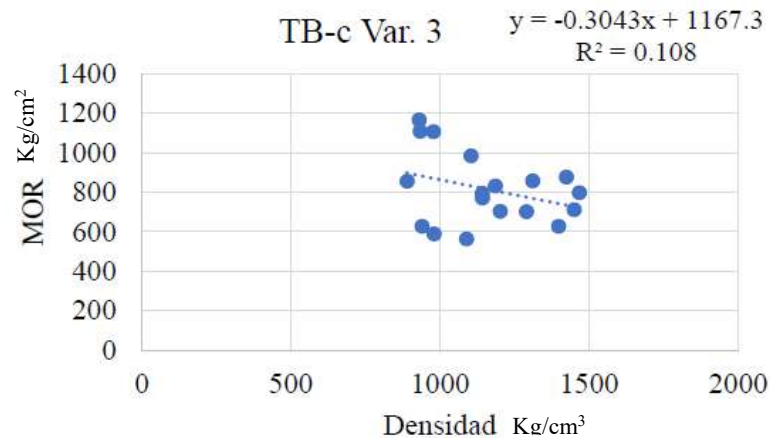


Figura 98 Regresión lineal MOR y densidad

En la fig. 99 se ve la tendencia de una regresión lineal con un R^2 de 0.013 se demuestra que no existe una relación entre ambas variables ya que a mayor número de anillos de crecimiento no habrá un mayor módulo de ruptura.

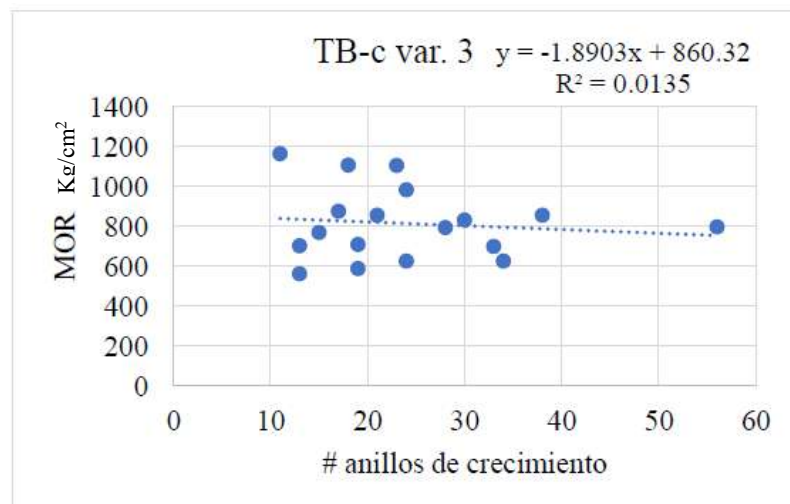


Figura 99 Regresión lineal número anillos de crecimiento y densidad

En la fig. 100 se hace una regresión lineal entre las variables de carga y de tiempo para corroborar el colapso que sufre una pieza estructural en un tiempo determinado, aplicando una fuerza determinada con una R^2 de 0.016, que indica la variación que sufren estas variables.

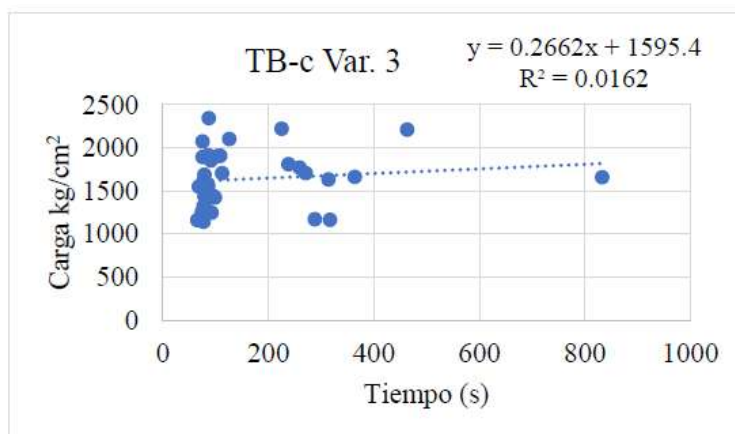


Figura 100 Regresión lineal carga (kg/cm²) y tiempo (s)

En la fig. 101 se muestra la relación entre el módulo de elasticidad y módulo de rotura en flexión. El valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.442$) indica que las variaciones en el módulo de elasticidad explican el 0.442 % de la variabilidad del módulo de ruptura y el módulo de elasticidad posee un elevado valor predictivo.

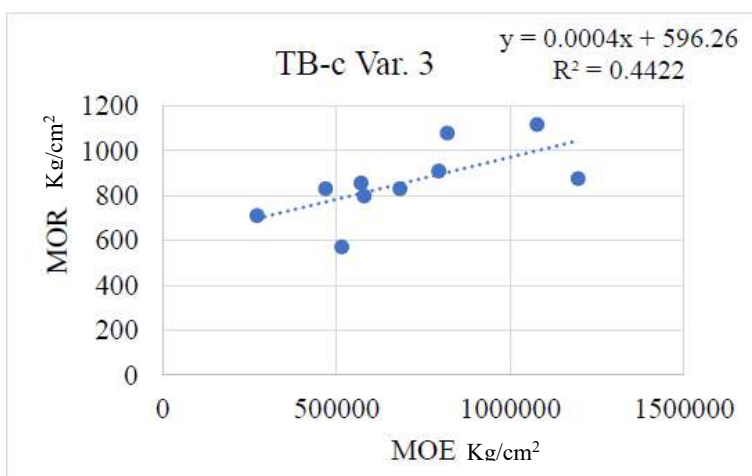


Figura 101 regresión lineal de MOR y MOE

El módulo de elasticidad con respecto al número de anillos de crecimiento con valor R^2 de 0.262 indica que las variaciones del módulo de elasticidad dieron como resultado un valor de 0.262% de variabilidad fig. 102.

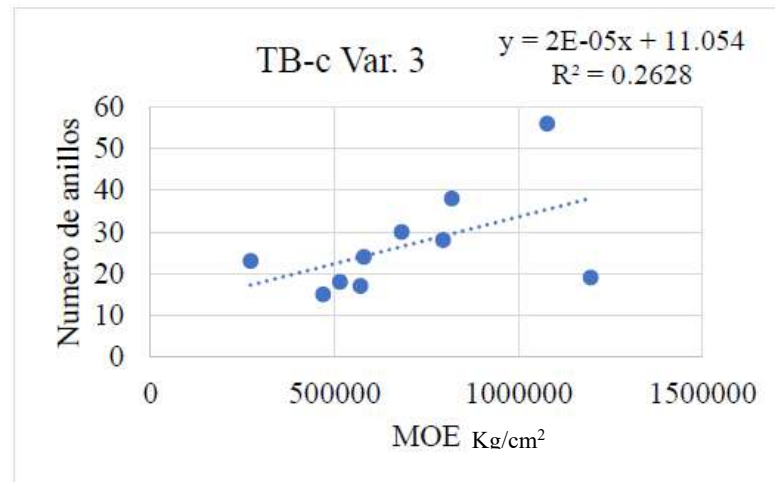


Figura 102 Regresión lineal del MOE y número de anillos de crecimiento.

En fig. 103 se presenta la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad. El valor determinado de la R^2 es de 0.551 indicando unas variaciones entre el módulo elástico con respecto a la densidad con un 55%.

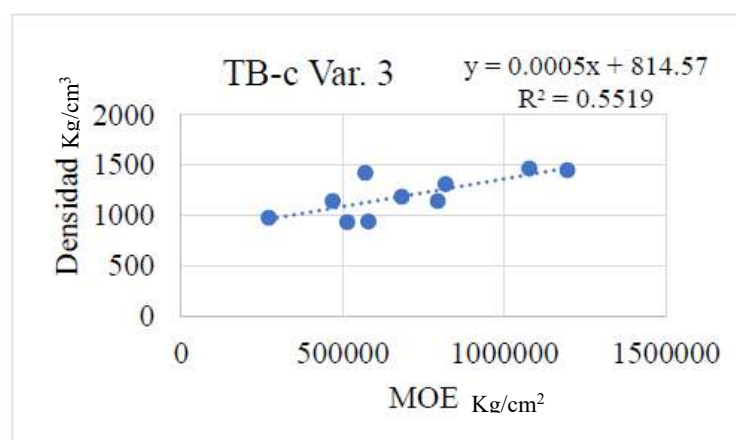


Figura 103 regresión lineal MOE y densidad.

Tratamiento 4 (Madera-malla metálica-madera)

La fig. 104 muestra la relación entre la densidad y el módulo de ruptura MOR, de los cuales se obtuvieron con una regresión lineal un valor calculado de R^2 de 0.0019 que indica las variaciones existentes en el módulo de ruptura con respecto a la densidad, por lo tanto, no existe una relación directa entre estos dos factores

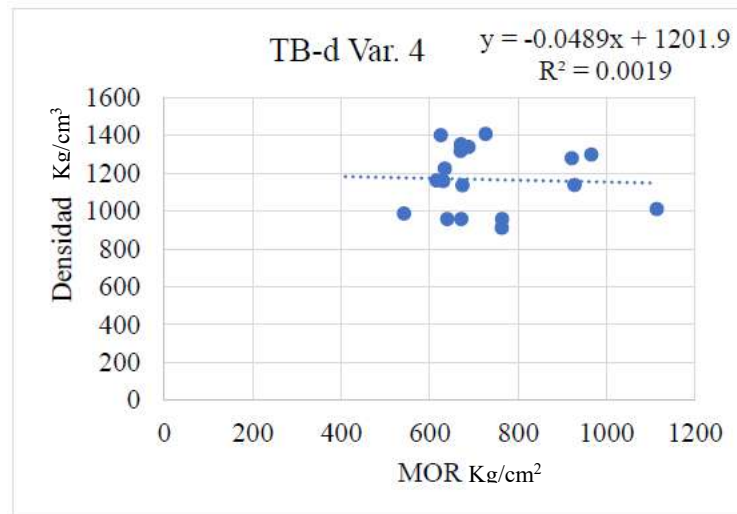


Figura 104 Regresión lineal entre densidad y el MOR

En la fig. 105 es una relación entre el número de anillos de crecimiento y la densidad, obteniendo una regresión lineal con una R^2 de 0.23, comprobándose que no existe una relación directa entre las dos variantes analizadas.

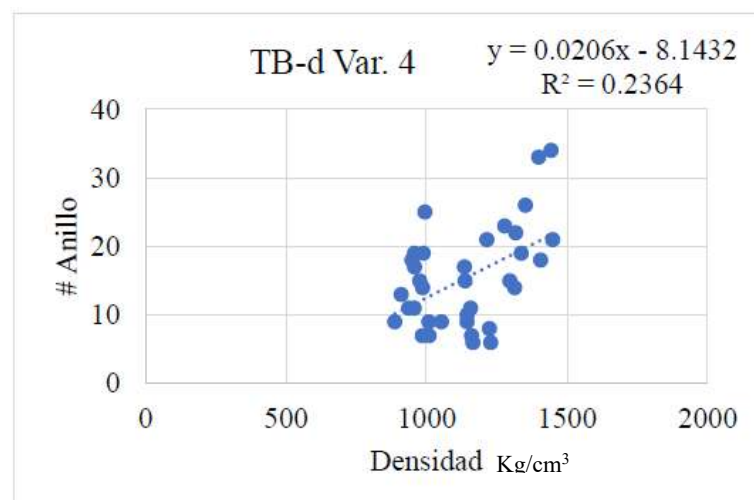


Figura 105 Regresión lineal entre densidad y anillos de crecimiento

En la fig. 106 se ve la tendencia de una regresión lineal con un R^2 de 0.010 se demuestra que no existe una relación entre ambas variables, ya que a mayor número de anillos de crecimiento no habrá un mayor módulo de ruptura.

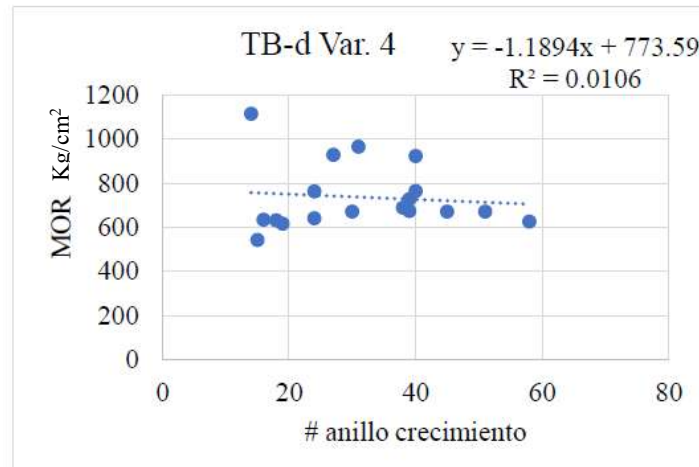


Figura 106 Regresión lineal el MOR y el número de anillos de crecimiento

En la fig. 107 se hace una regresión lineal entre las variables de carga y de tiempo, corroborando el tiempo de duración entre el colapso que sufre las piezas estructurales en un tiempo determinado aplicando una fuerza puntual, con una R^2 de 0.217 que indica la variación que sufren estados dos variables.

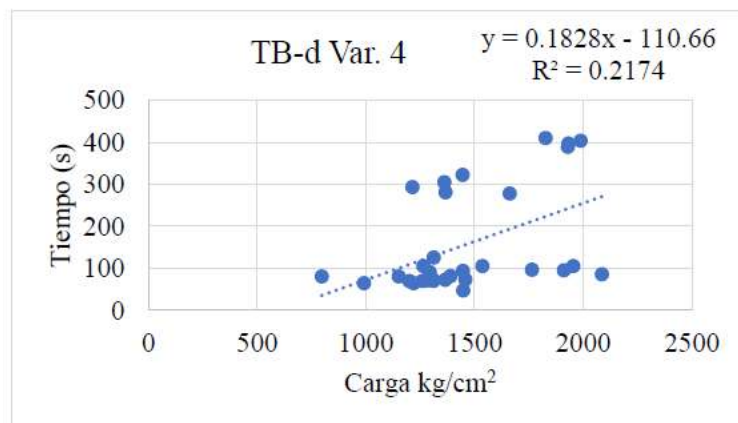


Figura 107 Regresión lineal tiempo y carga.

En la fig. 108 se ve la relación entre el módulo de elasticidad y el módulo de rotura en flexión. El valor del coeficiente obtenido es de $R^2 = 0.096$ que indica las variaciones en el módulo de elasticidad explicando el 0.442 % de la variabilidad del módulo de ruptura, por lo tanto, el módulo de elasticidad posee un elevado valor predictivo.

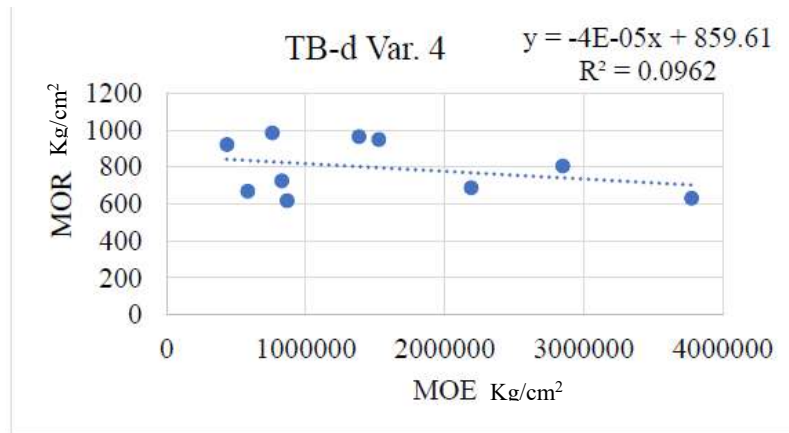


Figura 108 Regresión lineal el MOR y el MOE

En la fig. 109 se presenta la relación entre el módulo de elasticidad y la densidad. El valor determinado de la R^2 es de 0.035 indica las variaciones entre el módulo elástico con respecto a la densidad con 55%

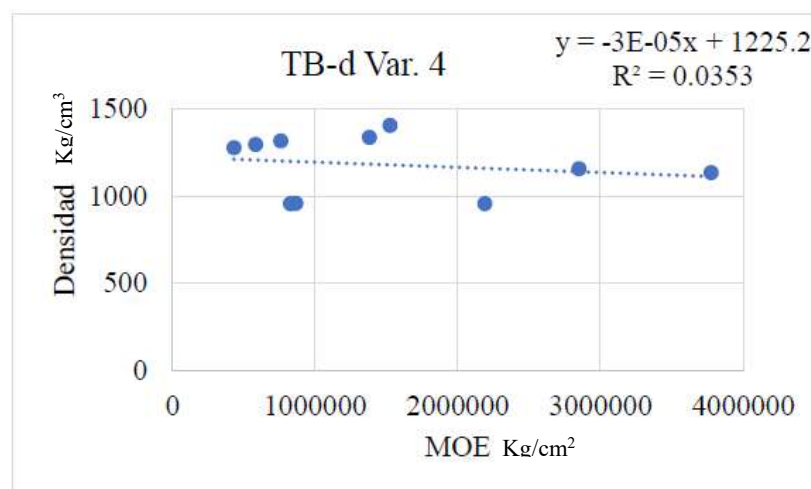


Figura 109 Regresión lineal de la densidad y el MOE.

13.6 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

La técnica consiste en colocar la muestra en la cámara de vacío del (MEB) y retirar todo el aire que se encuentra dentro de ella. De manera inmediata se enciende el emisor de electrones para bombardear la muestra. Los electrones viajan a través del arreglo de lentes diseñados para obtener un haz convergente de electrones fig. 110,111.

Las bobinas ubicadas bajo el arreglo de lentes dirigen al haz de electrones de izquierda a derecha y de arriba a abajo de tal forma que se realiza un barrido en toda la superficie de la muestra que se encuentra en la base de la cámara de vacío. Los electrones que golpean la muestra salen difractados hacia el detector. Este último capta esa señal y la manda a un procesador donde se convierte en imagen.



Figura 110 Microscopio electrónico

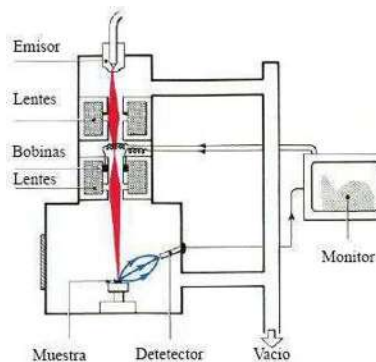


Figura 111 Esquema de MEB

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta muy importante en la ciencia de materiales y en la ingeniería; se utiliza para medir las características microscópicas, la clasificación de las fracturas, los estudios de la microestructura, las evaluaciones de los recubrimientos de poco espesor, el examen de la contaminación de la superficie y el análisis de fallas en los materiales.

En contraposición a la microscopia óptica en la cual la superficie es expuesta a la luz visible incidente, el microscopio electrónico de barrido (SEM) dirige un haz de electrones enfocado a un punto de la superficie de una muestra a analizar recoge y muestra las señales electrónicas emitidas por la muestra.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) permite la observación y caracterización superficial de materiales orgánicos e inorgánicos, entregando información morfológica del material analizado. A partir de él se producen distintos tipos de señal que se generan desde la muestra y se utilizan para examinar muchas de sus características.

Con él se pueden realizar estudios de los aspectos morfológicos de zonas microscópicas de los distintos materiales. Las principales utilidades del SEM son la alta resolución ($\sim 100\text{\AA}$), la gran profundidad de campo que resuelve una imagen tridimensional de la muestra y la relativa sencillez de preparación de las muestras (Clavijo, 2013).

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores, entre los que se pueden mencionar: un detector de electrones secundarios para obtener imágenes de alta resolución (SEI), un detector de electrones retrodispersado que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie (BEI) y un detector de energía dispersiva (EDS) que permite detectar los rayos X generados por la muestra y realizar análisis de distribución de elementos en superficie.

El proceso de fabricación de madera laminada encolada para uso estructural está definido por una serie de requisitos determinantes en la calidad final del producto.

La EN 14080 define ciertos requisitos con relación a las uniones dentadas. Parámetros como la geometría del diente o la presión en el ensamblaje están específicamente señalados en dicha norma y deben cumplirse para optimizar el comportamiento resistente de la unión. Factores tales como contenido de humedad y temperatura, comportamiento del adhesivo, geometría del diente, presión aplicada, etc.

Actualmente existen en el mercado diversos tipos de adhesivos para madera laminada calificados normativamente como válidos para uso estructural, con diferencias notables entre ellos en cuanto a su composición.

Adhesivos basados en melamina urea formaldehído, resorcinol, isocianatos o poliuretanos se encuentran en mayor o menor medida extendidos dentro del mercado de madera laminada estructural. Por otro lado, la madera de coníferas empleada en la gran mayoría de la madera laminada encolada fabricada a nivel mundial.

13.7 MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO

En materiales ortótropos se deriva la madera como una de las materias prima de origen vegetal con recurso renovable la cual está formada por fibras de celulosa, sustancia que conforma el esqueleto de los vegetales y lignina, que le proporciona rigidez y dureza.

En México existen áreas que cuentan con gran variedad de especies maderables siendo en la región de Michoacán, donde predominan abundantes especies de coníferas a lo largo de la Sierra Madre del sur.

Produciéndose madera temprana y la madera tardía; la primera se forma en primavera y tiene células de diámetro relativamente grandes y paredes de menor grosor; mientras que la segunda se forma en otoño y presenta células de menor dimensión en diámetro, pero con paredes más gruesas, lo que proporciona una mayor densidad y resistencia.

La madera es un material anisotrópico que presenta tres planos o cortes: el transversal, el tangencial y el radial que dan como resultado distintos tipos de propiedades físico-mecánicas.

La estructura celular de las coníferas está formada por dos tipos de células que son las traqueidas y los radios o parénquima radial, existen también depósitos de resinas paralelos al eje del tronco llamados canales resiníferos, se distinguen dos tipos de traqueidas las verticales y radiales, su función es la de soportar cargas axiales y la conducción de líquidos, son células largas de 2 a 6 mm en forma de hueso y con puntuaciones areoladas localizadas en sus caras radiales.

Aguilar (2014) menciona que las traqueidas son células largas de paredes gruesas, con extremos afilados y paredes porosas siendo su función el sostén y conducción en la madera. Según Haselein (2000) desde el punto de vista mecánico, las células que forman la madera se pueden considerar como un grupo de cilindros huecos, cuya continuidad se ve afectada por los traslapes que hay entre ellos, por las células de los rayos que además de modificar su orientación generan campos de cruce con una gran cantidad de punteaduras que alteran las paredes celulares convirtiendo estos campos en zonas de menor resistencia.

Espesamientos en las paredes son las barras cilíndricas, que se extienden a través del lumen de una pared tangencial a la otra, llamadas trabéculas. Las trabéculas aparecen especialmente en las coníferas y son muy raras en las latifoliadas.

En el presente trabajo se estudian las dimensiones de las fibras (traqueidas) obtenidas por método de disociado de *Pinus pseudostrobus* L. por medio de la microscopia óptica y electrónica de barrido MEB. Se presentan valores de longitud de fibra, diámetro de fibra, diámetro del lumen, grosor de pared, coeficiente de flexibilidad, índice de rigidez y relación Runkel. Se presentan los parámetros principales de estadística descriptiva para cada carácter (valores máximo y mínimo, coeficiente de variación, desviación estándar y media aritmética).

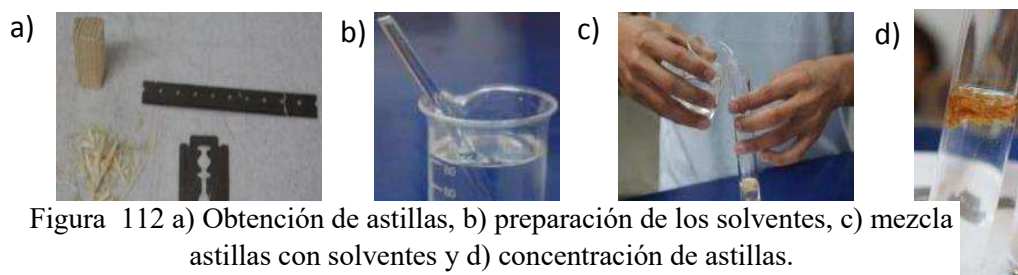


Figura 112 a) Obtención de astillas, b) preparación de los solventes, c) mezcla astillas con solventes y d) concentración de astillas.

13.8 METODOLOGÍA PARA LA EXTRACCIÓN DE FIBRAS (TRAQUEIDAS)

La obtención de la madera de *Pinus pseudostrobus* L. fue proporcionada del municipio de Ichaqueo Michoacán por el aserradero Ichaqueo dedicados a productos forestales. Se elaboraron cubos de 2 x 2 x 2 cm para la extracción de las astillas y utilizarlo en le disociado. Guridi (1998).

Disociado de fibras (traqueidas)

Se obtuvieron pequeñas virutas de la cara radial de los cubos las cuales fueron utilizadas para aplicar la técnica de disociado utilizando una mezcla de ácido acético, ácido nítrico, ácido láctico y glicerina con un 25% para cada una, a una proporción de (1:1:1:1) sometidas en baño maría hasta la disociación total fig. 113.

Después de eliminar la mezcla de disociado, el material lavado con agua destilada y teñido con pardo de Bismarck, se procedió a esparcir el material sobre el portaobjetos, para luego ser montado con resina sintética fig. 118.

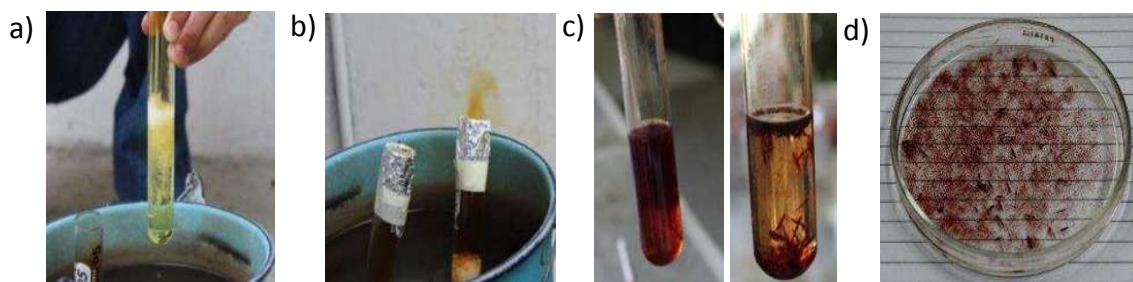


Figura 113 a), b) Astillas sometidas al ablandamiento en baño maría hasta lograr su disociación, c) teñido de astillas por 15 minutos, lavado de astillas con agua a presión, d) fibras que serán analizadas.

La morfología de la madera se investigó mediante el uso de un microscopio óptico marca Binolux en aumento de 4x, 10x y 40x, analizando 29 mediciones al azar por cada carácter considerando las variables, longitud de fibra (traqueida), diámetro de fibra (traqueida), diámetro del lumen y grosor de la pared celular.

La morfología de la madera se investigó mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 de electrones secundarios y retrodispersados. Los mapeos fueron en el sentido de las manecillas del reloj con el objetivo de observar la composición de la estructura interna de la madera de *Pinus pseudostrobus* L.

En la fig. 118 se muestra cómo se obtuvieron piezas de madera de *Pinus pseudostrobus* L. para las muestras del microscopio electrónico de barrido; se extrajeron cubos orientados en sentido transversal, tangencial y radial con una dimensión de 8 x 8 x 8 mm. Para el análisis de la microestructura de la madera se utilizó un software analizador de imágenes pro-imagen.

13.9 ÍNDICES DE FIBRA

Coefficiente de rigidez: El cálculo de esta relación se obtiene al dividir el grosor de las dos paredes celulares de la fibra entre el diámetro de esta. Índice de rigidez: $C.R. = 2W/D$ Tabla 15.

Tamatarit (1996) **Relación de Runkel:** Esta se determinó al dividir el grosor de la pared multiplicado por el factor dos celulares de la fibra entre el diámetro del lumen. $R.R. = 2w/l$. Tabla 15.

Porres (1979) **Coefficiente de flexibilidad:** Es la relación de diámetro del lumen entre el diámetro de la fibra este coeficiente tiene una relación directa con su pulpa densidad mayores resistencias a la explosión y a la tensión. $C.F. = l / D$ Tabla 15.

Tabla 15 Nomenclatura de índices de fibra y clasificación de índices de rigidez.

1. Índice de rigidez: $C.R. = 2W/D$
2. Índice de flexibilidad: $C.F. = l / D$
3. Relación Runkel: $R.R. = 2w/l$

C. R. = coeficiente o índice de rigidez w = grosor de la pared de la fibra
D = diámetro de la fibra
C.F. = coeficiente de flexibilidad l = diámetro del lumen
R.R. = relación de Runkel

Clasificación del índice de rigidez (2W/D)	
Rango	Clasificación del grosor de pared
<0.20	Muy delgada
0.20 - 0.35	Delgada
0.35 - 0.50	Media
0.50 - 0.70	Gruesa
>0.70	Muy gruesa

Para llevar a cabo el análisis estadístico básico, primeramente, se estimó el tamaño de muestra para saber si éste era el adecuado para realizar las mediciones correspondientes. Se midieron 30 traqueidas al azar, al igual que el diámetro de traqueida, diámetro de lumen y grosor de las dos paredes celulares. Los valores fueron capturados en Excel para obtener la varianza, la media, valores mínimos y máximos de cada una de las muestras.

Las características anatómicas macroscópicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* L. señalan que la textura media y el hilo entrecruzado presentes, pueden tener influencia negativa en el proceso de maquinado. Por otro lado, debido a la coloración clara y considerando que no presenta olor ni sabor, favorece la utilización de la madera para productos asociados con el tacto o que estén en contacto con alimentos. Ver tabla 19 Características macroscópicas de la madera de *Pinus pseudostrobus* L.

13.10 DESCRIPCIÓN ANATÓMICA DE LA MADERA DE *PINUS PSEUDOSTROBUS* L.

13.10.1 Características organolépticas

La especie en estudio presenta diferencia de color entre la madera de albura y la madera del duramen, la albura es de color blanco (HUE IOYR 8/2) con vetas amarillas (HUE IOYR 7/6) y el duramen rosado (HUE SYR 7/4) con vetas ligeramente más oscuras. El olor y sabor de la madera es característico a resina.

Tabla 16 Características organolépticas

Características	Descripción
Color duramen	HUE SYR 7/4 rosa con vetas en un tono más oscuro.
Color albura	HUE IOYR 8/2 con vetas amarillas HUE IOYR 7/6
Olor	Resina
Sabor	Resina
Veteado	Pronunciado con un diseño angular en la cara tangencial y diseño en líneas paralelas en caras radial.
Textura	Media tendiendo a fina
Hilo	Recto- irregular donde hay nudos

La textura es media tendiendo a fina, con hilo de recto a irregular en zonas cercanas a nudos. La madera posee veteado pronunciado con diseño angular en la cara tangencial y diseño veteado en la cara radial fig. 114.

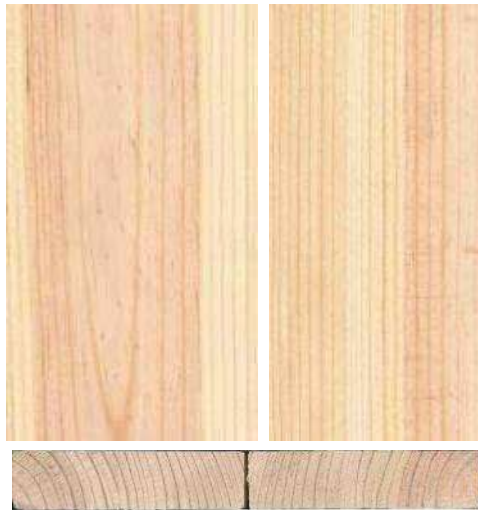


Figura 114 Tablillas de madera de pino

13.11 DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA

Los anillos de crecimiento son notorios con transición abrupta y semi abrupta, presentan variación de color (crema en la madera temprana y castaño en la madera tardía), así mismo el ancho de los anillos varían entre 2.5-6.5 mm, se observa de un 8-20% de madera tardía, 92-80% de madera temprana y radios ligeramente notorios a simple vista. Los canales resiníferos se encuentran distribuidos irregularmente y se observa con más frecuencia en la parte final de los anillos, fig. 115.

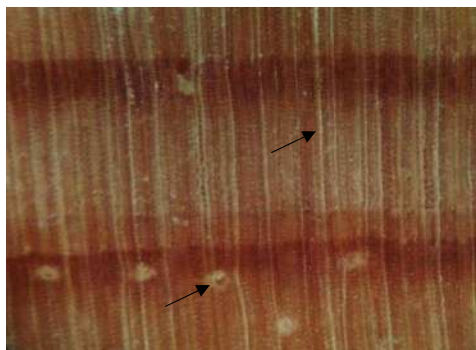


Figura 115 Sección transversal vista a 20 X, mostrando zonación, canales resiníferos y radios medulares.

Las traqueidas en sección transversal se aprecian de contorno rectangular a poligonal irregular, con paredes de grosor medio a gruesas, presentando en promedio 7 μm (2.5-12

μm), el diámetro de las traqueidas de 36 μm -78 μm , fig. 116. Las traqueidas son largas con longitud promedio de 5.2 mm (3.9- 6.1 mm), y presentan punteaduras areoladas de diámetro variable 18-24.5 μm y abertura circular, el acomodo de las punteaduras es variable observándose en una hilera y en ocasiones en dos hileras, además presentan refuerzos tipo crásula, así mismo se observan traqueidas axiales en cadena. Y las traqueidas radiales presentan paredes de semi aserradas a casi lisas (observándose en cara radial) fig. 117.

Los **canales resiníferos** son de tipo tilosoides, con células de pared delgada, son de forma circular y diámetro promedio de 141 μm (116 μm - 165 μm)

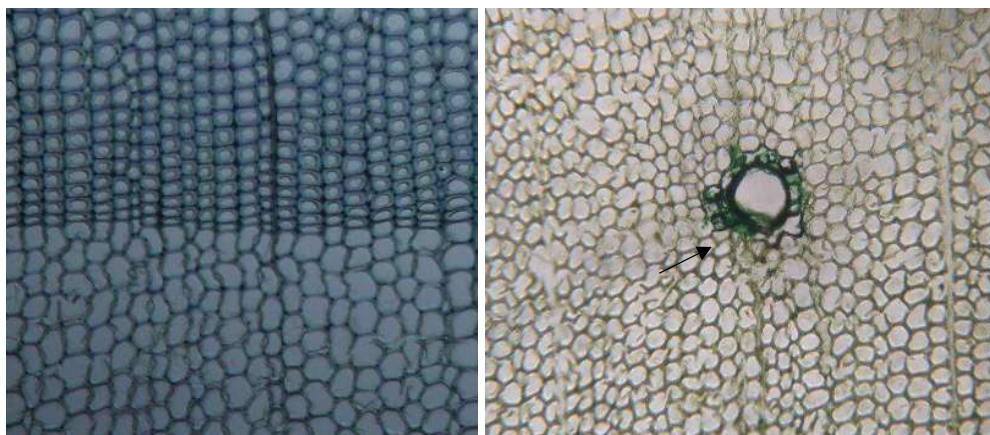


Figura 116 Cortes transversales vistos a 100X, mostrando forma de las traqueidas en madera temprana y tardía en distintos anillos de crecimiento (izquierda) y canal resinífero en madera temprana.

13.12 CORTES HISTOLÓGICOS

Las siguientes imágenes fueron tomadas con un microscopio óptico a 10 y 40 x, donde se tomaron medidas de las traqueidas y se hizo un análisis microscopio fig. 119.

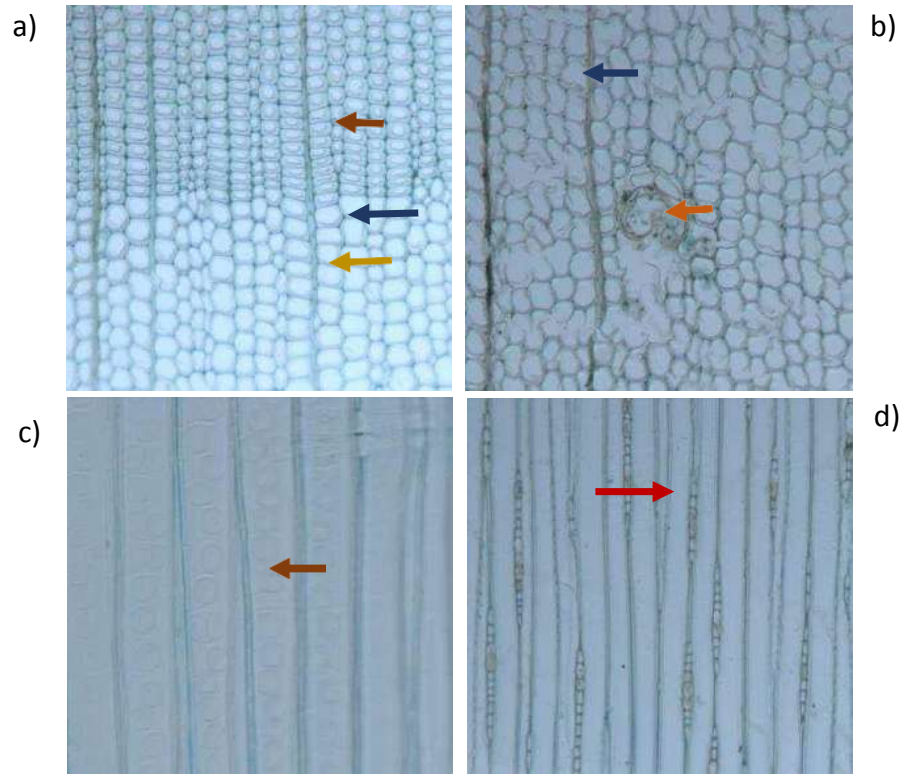


Figura 117 Corte transversal a): corte transversal a 20x, parénquima radial, madera temprana y tardía.
b): Canal resinífero, madera temprana, madera tardía vista a 20x. Corte radial
c): corte visto a 20x muestra radios, puntuaciones areoladas en hilera simple y doble.
Corte tangencial d): radios uniseriados a 20x.

13.13 DISOCIADO

En la fig. 120 se observan las traqueidas que son de tipo septadas con punteaduras simples y areoladas en una y dos filas, presentan arreglo y contorno de manera irregular, con un diámetro de traqueida promedio de 63 μm , con paredes gruesas de 60 μm y una longitud promedio de 3920 μm .

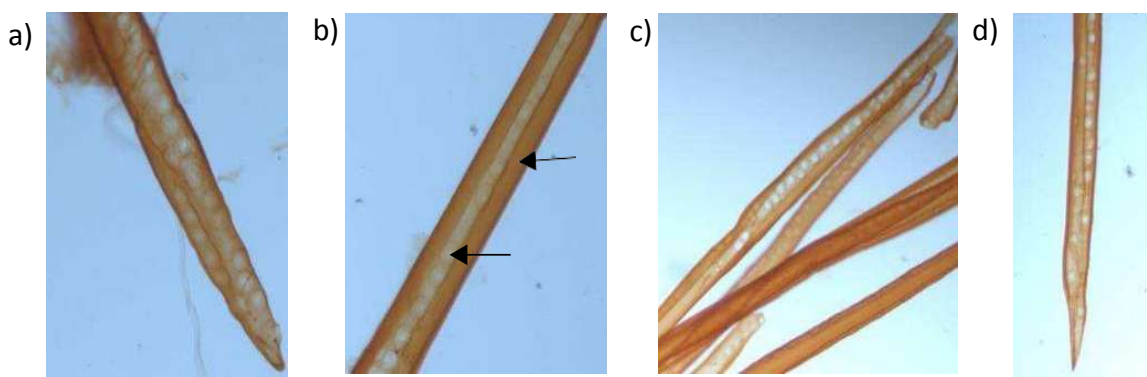


Figura 118 Material dissociado a), b) puntuaciones areoladas, pared celular, lumen en sentido longitudinal, c), d) puntuaciones simples y areoladas.

En la tabla 17 se muestra un resumen de la estadística básica de todas las variables investigadas, mínimo, máximo, media, (S) desviación estándar y (CV) coeficiente de variación.

Tabla 17 valores promedios de mediciones de traqueidas

Variables	n	Media (μm)	Mínimo (μm)	Máximo (μm)	S (μm)	C.V. %
Longitud de Traqueida	29	3920	1800	700	1331	339
Diámetro de Traqueida	29	63	40	90	11	189
Diámetro de Lumen	29	33	10	70	12	368
Grosor de Pared	29	60	40	10	16	271
Coefficiente de rigidez	29	488	232	810	162	333
Coefficiente de Flexibilidad.	29	520	250	777	121	233
Relación Runkel.	29	1030	295	2020	530	514

El promedio de longitud de traqueida se encuentra dentro del rango de las fibras consideradas para coníferas de 2000 a 7000 μm , el dato resultante es de 3920 μm , para el diámetro de traqueida se obtuvo una media de 63 μm y un diámetro de lumen de 33 μm .

De acuerdo con la tabla de clasificación de índice de rigidez de Petroff (1968) y Porres (1979) la media obtenida es de 488 μm y se encuentra dentro del rango de 0.35-0.50 con una clasificación de grosor de pared media.

Para el coeficiente de flexibilidad el dato obtenido es de 520 μm de acuerdo con el parámetro establecido por petroff se ubica en un rango de 0.50-0.65 con características de fibras en sección transversal elíptica, parcialmente colapsadas presentando buena superficie de contacto y unión entre fibras.

Para la relación Runkel se determinó la media de 1030 μm de acuerdo con Larios (1979) y tamatarit (1996) lo determina como grado 4 con un rango de 1.00-2.00 con una clasificación como regular. Mientras tanto la clasificación Cabudivo muestra que la mayoría de las coníferas, quedan clasificadas como extremadamente anchos de traqueida, extremadamente anchos de lumen y extremadamente gruesas o grandes de pared celular

13.14 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO MEB

En la estructura interna de *Pinus pseudostrobus* L. que se muestra en la fig. 121 se observan las células parenquimatosas axiales, a) corte transversal: mediciones en sentido de las manecillas del reloj, b) corte tangencial: se observan rayos y puntuaciones areoladas en una y dos filas, c) corte tangencial: se observan rayos y puntuaciones areoladas en una y dos filas, ampliación de corte tangencial: puntuaciones areoladas en una fila, e) corte tangencial puntuaciones simples y campos de cruce en cuatro filas.

MUESTRA 3T

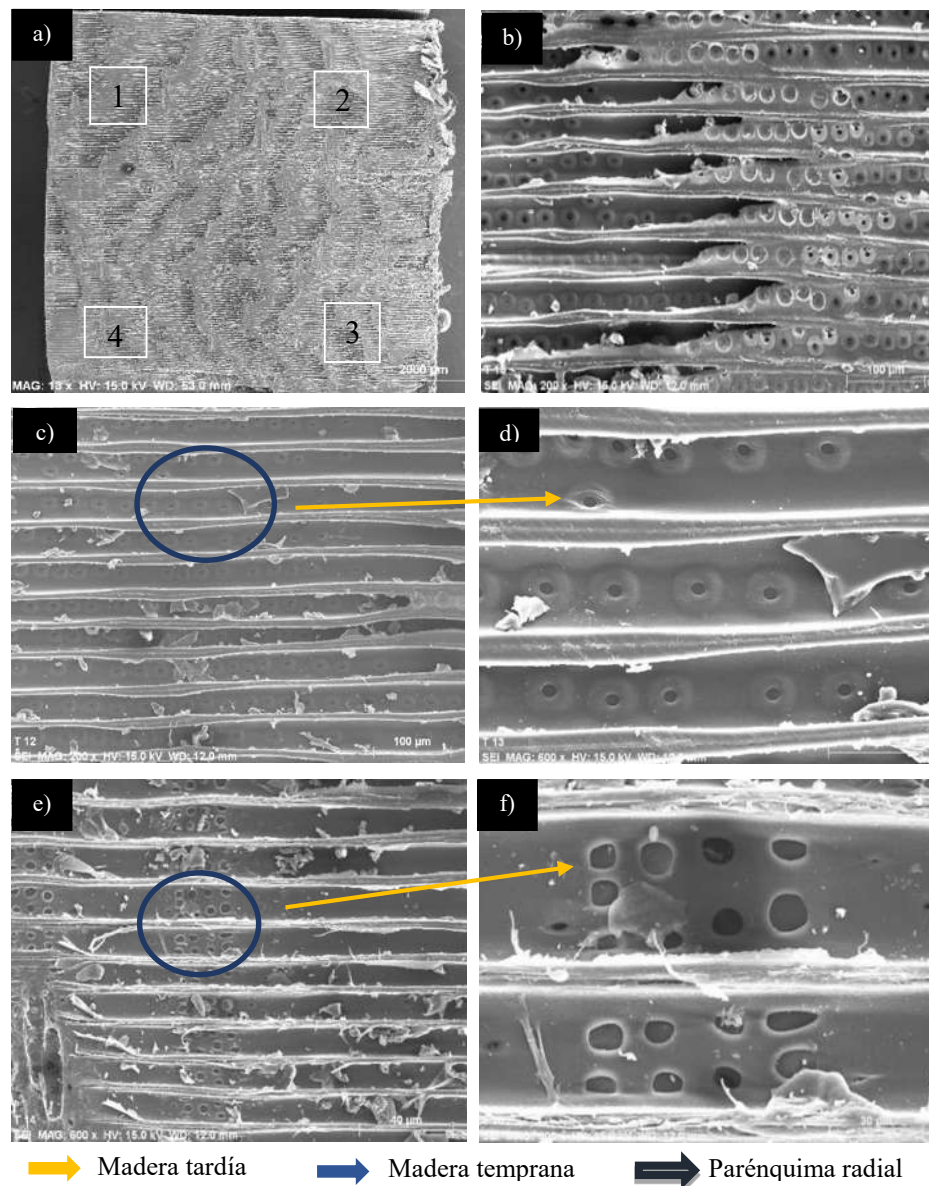


Figura 119 Imágenes del MEB de la estructura anatómica a) análisis de muestra en sentido de las manecillas del reloj, b) corte tangencial, 800x esc. 100 µm, c) corte tangencial 200x esc. 100 µm, d) ampliación corte tangencial 600 x a 40 µm, e,f) puntuaciones simples en campo de curce madera tardía, madera temprana, parénquima radial a 200x esc. 100 µm.

Para la segunda muestra analizada se de *Pinus pseudostrobus* L. que se muestra en la fig. 122 se observa características que son determinantes para la identificación de una especie maderable, a) corte transversal: mediciones realizadas en el sentidos de las manecillas del reloj, b,c,d) corte transversal: parénquima radial y lúmenes, e) madera tardía, madera temprana, parénquima radial, f) ampliación en corte transversal madera tardía temprana a 1000 x esc. 20 μ m.

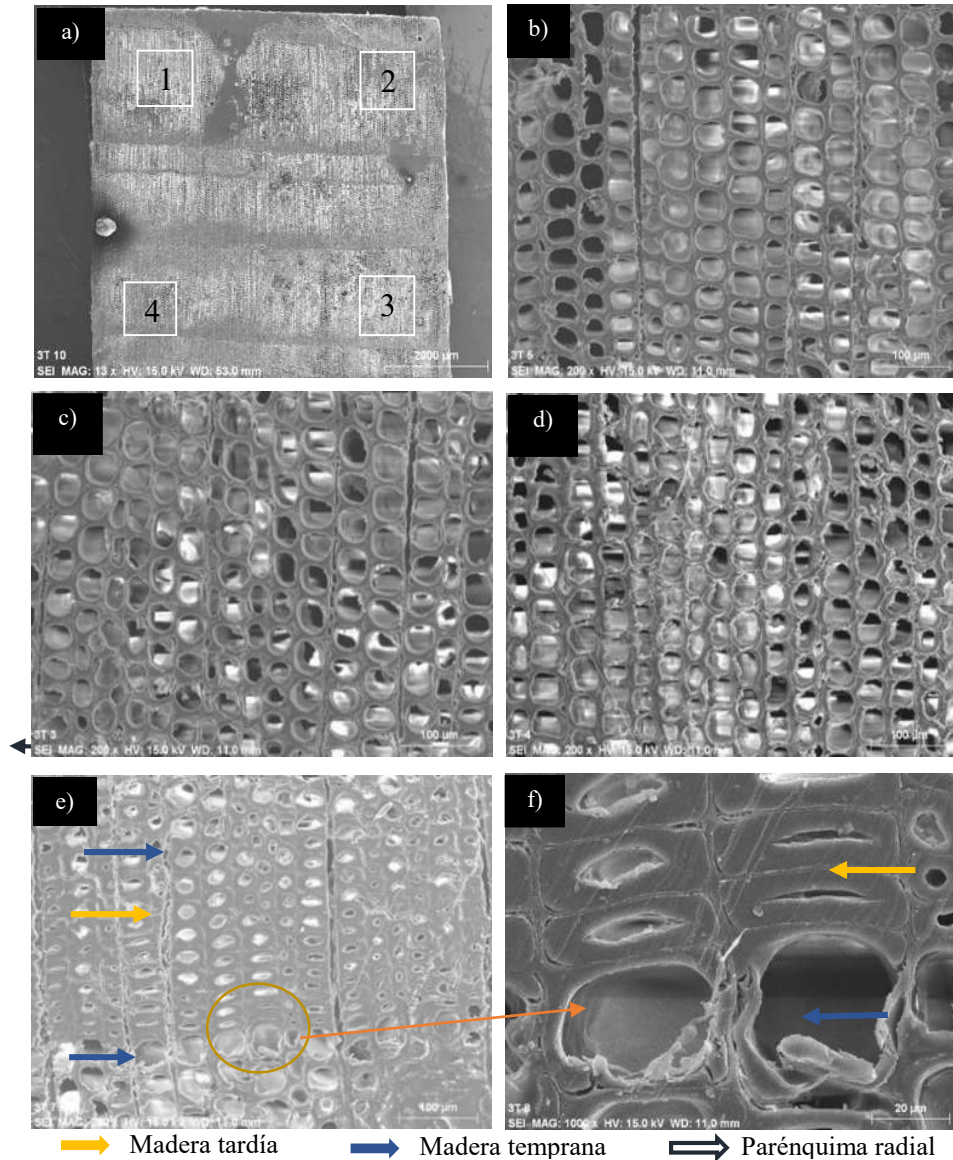


Figura 120 Imágenes del MEB de la estructura anatómica a) Análisis de muestra en sentido de las manecillas del reloj b) corte transversal 200x esc. 100 μ m, c) corte transversal micrografía 1 a 200 x esc. 100 μ m, d) corte transversal micrografía 2 a 200 x esc. 100 μ m e) corte transversal 200 x esc. 100 μ m, f) ampliación corte transversal 1000 x esc. 20 μ m

En la tabla 18 se ilustra el área total de la cantidad de lúmenes analizados que existen en un área de 8 mm siendo estos lúmenes espacios vacíos al interior de la madera, como se muestra en las fig. 126 y 127, obteniéndose un promedio para la pared celular de 43.85%.

Tabla 18 Porcentajes de lúmenes

Microscopio electrónico	
Lúmenes	Área total
Nº lúmenes	1408
% de lúmenes	43.85
% Pared celular	56.15

Se distinguen dos tipos básicos de puntuaciones: simples y areoladas fig. b 126. Para formar una puntuación areolada la pared secundaria desarrolla una extensión sobre la cavidad de la puntuación como una bóveda sobre ella, dejando en el centro una abertura llamada poro. Las puntuaciones varían mucho en su aspecto, su distribución, tamaño, profundidad y detalles estructurales tienen gran importancia en la identificación de maderas.

Las puntuaciones areoladas se observan de diferente forma de acuerdo con el plano de observación. Giménez (2005) reporta que la membrana primaria sufre un engrosamiento para formar un torus que está sustentado por un margo o retículo de sustentación, en las puntuaciones simples no se verifica este desplazamiento de la membrana secundaria fig. e,f 126.

Para la elaboración de los conectores se pueden usar diferentes tipos de soldaduras a continuación se hace mención de algunas que pudieran ser útiles en la fabricación de estos conectores de acuerdo con el diseño y material con el que se realicen.

Tabla 19 tabla de porcentajes de humedad en equilibrio

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C)	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

13.15 COPOLÍMERO DE ETILENO-TETRAFLUOROETILENO (ETFE)

Es una alternativa de solución para recubrimiento de las estructuras a la intemperie, ha sido muy usado en otros países para crear microclimas al interior por su característica de ser muy durables y un material ligero. A continuación, se dan algunas especificaciones sobre el material.

El copolímero de etileno-tetrafluoroetileno o poli(etileno-co-tetrafluoroetileno), conocido también por su acrónimo ETFE, es un fluoropolímero termoplástico, fue diseñado para tener una alta resistencia a la corrosión y resistencia a lo largo de un amplio rango de temperaturas. El ETFE tiene una temperatura de fusión muy alta, resistencia química y eléctrica y excelentes.

Diseñado (alrededor de los años '70 cuando DuPont inventó un polímero de fluoro-carbono para ser utilizado como material aislante en la industria aeronáutica).

Posee una elevada resistencia química y mecánica (al corte y a la abrasión), así como una gran estabilidad ante cambios de temperatura (soporta hasta 170°C).

Su peso es de sólo el 1%, transmite más luz y su costo es entre 24% y 70% menor, comparado con el vidrio.

13.15.1 Principales ventajas:

- Amplio espectro de temperaturas de ejercicio; baja inflamabilidad;
- Excelentes propiedades mecánicas y dieléctricas.
- Resistencia a disolventes y agentes químicos.
- Elevada resistencia a condiciones climáticas exteriores.
- Alta transmisión de la luz en los espectros del visible y del UV
- Alta antiadherencia.
- Excelente resistencia al desgarro
- Baja permeabilidad;
- Alta resistencia a la radiación fig. 123

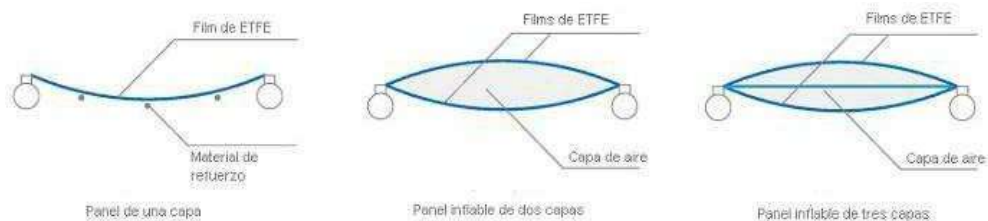


Figura 121 Configuración de los paneles de ET

A continuación, se presenta una serie de conceptos y datos estadísticos que sustentaran la investigación realizada, los cuales serán componentes que determinen el diseño de la cubierta de madera, siendo el clima uno de los principales factores que influyen los diferentes esfuerzos a los que es sometida la estructura.

13.16 ANÁLISIS FÍSICO- GEOGRÁFICO

13.16.1 Localización y ubicación

Es importante conocer las características físico- geográficas del lugar donde se situará el proyecto porque nos proporcionará datos que son relevantes al momento de diseñar una estructura de madera, dicho diseño se hará para el edificio D de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Por lo tanto, el municipio de Morelia queda ubicado entre los paralelos 19°30' y 19°50' de latitud norte, y los meridianos 101°00' y 101°30' de longitud oeste, en la región centro-norte del estado de Michoacán. (INEGI, s.f.)



Figura 122 Ubicación geográfica del estado de Michoacán.

13.16.2 Vientos dominantes y temperatura de la ciudad de Morelia

Es un factor determinante que se usa al momento de hacer un diseño constructivo en este caso direccionado a las cubiertas de madera.

Los vientos proceden del suroeste y noroeste, en el mes de julio y agosto, como se observa en la tabla el mes de julio, agosto y septiembre son los meses donde varían los vientos dominantes.

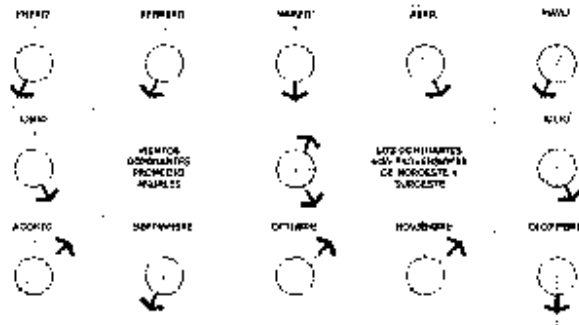


Figura 123 Direcciones de los vientos durante todo el año en Morelia Michoacán

13.16.3 Soleamiento para la ciudad de Morelia

Las siguientes graficas propuestas por el Laboratorio Monitoreador de Radiación Solar de la Universidad de Oregón, representan la trayectoria que el sol realiza durante las 24 horas del día, dicha trayectoria es fundamental para la solución arquitectónica.

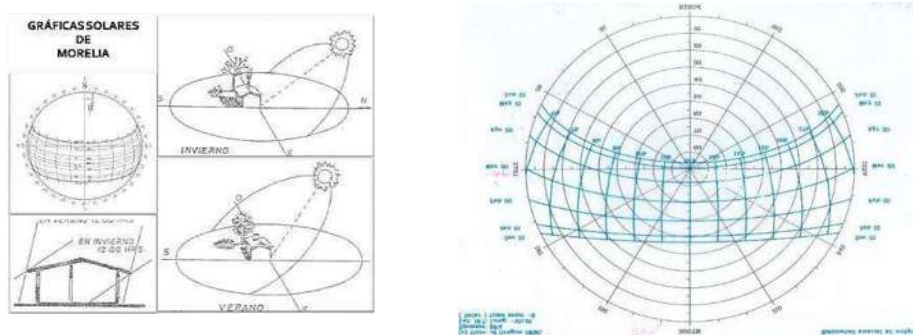


Figura 124 Grafica solar de Morelia adquirida de la Universidad de Oregón.

En el invierno la inclinación de los rayos solares es mayor que en los del verano. Por lo tanto, significa que los rayos del sol podrán iluminar – asolear más a través de las ventanas existentes debido a su inclinación en invierno, mientras que para el verano habrá menos iluminación –soleamiento.

El periodo de mayor soleamiento se presenta en los meses de mayo a agosto, donde el porcentaje mensual abarca de las 5:30 a las 19:30 hrs. del día, presentando una inclinación de 4° hacia el hemisferio norte. En los meses marzo, abril, septiembre, octubre, noviembre y febrero, se observa una inclinación del sol hacia el hemisferio sur de 44° y el asoleamiento promedio es de 6:00 a 18:00 hrs. En invierno, el porcentaje disminuye, siendo de 6:35 17:15 hrs. aprox.

La insolación registrada anualmente se verifica en los meses de enero y abril, considerando en este periodo como las tasas más elevadas de iluminación, con 250 horas mensuales promedio, mayo con 208 horas mensuales y de junio y septiembre los meses con mayor insolación con un total de 160 a 170 horas mensuales promedio.

En los meses de enero a marzo, se registra la mayor cantidad de días despejados, 9 días mensuales aproximadamente y, en los meses de abril, mayo, noviembre y diciembre de 4 a 6 días despejados promedio. Se registran los días medio nublado en los meses de enero a junio y octubre a diciembre, registrándose con mayor cantidad de días nublados con 9.5 a 19.5 días mensuales respectivamente.

Los días nublados se registra en mayor cantidad en el periodo comprendido entre los meses de mayo a octubre de 15 a 26.5 días mensuales, periodo más bajo es de enero a abril y noviembre con 5 días mensuales promedio.

El periodo frío anual comprendido entre los meses de noviembre a principios de marzo, la orientación de edificaciones con dirección noreste y noroeste, son más recomendables ya que esta orientación cuenta con el periodo mensual de asoleamiento de 3.06 hrs/día. Se considera como la orientación más favorable hacia el hemisferio sur, suroeste, contando con un máximo de asoleamiento de 6.91 hrs/día en promedio.

La orientación este- oeste se considera también adecuada para algunas áreas pues el asoleamiento a considerar en promedio es de 6 hrs en el periodo invernal.

El soleamiento con dirección sur es el más recomendable, registrando 10.30 hrs/día.

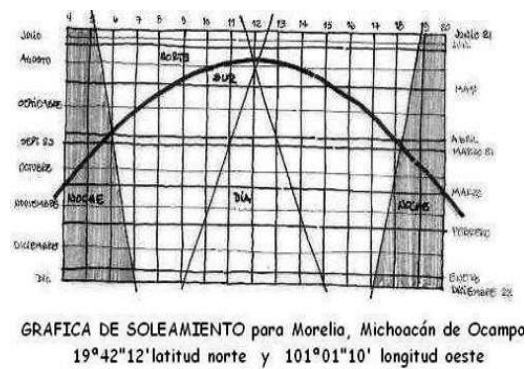


Figura 125 grafica de soleamiento

13.16.4 Temperatura en Morelia

- › Predomina el clima templado con humedad media.
- › Precipitación entre 700 a 1000 mm. De precipitación anual y lluvias ~~invernales~~ máximas de 5 mm.
- › Temperatura media anual 16.2 °C en la zona serrana del municipio y 18.7 °C ~~en~~ las zonas más bajas
 - › Clima templado subhúmedo, con humedad media.
 - › Temperatura promedio anual 17,5 °C
 - › Precipitación 773,5 mm anuales.

En la tabla se muestran los meses del año, así como su temperatura promedio máxima y mínima en °C y la precipitación que existe para la ciudad de Morelia, con estos datos se tendrá precisión de la variante de cambios climatológicos durante todo el año que se deben tener presentes al momento del diseño de la estructura que se propone.

13.16.5 Precipitación pluvial en la ciudad de Morelia

Tabla 20 Temperatura y precipitaciones

Temperaturas y precipitaciones promedio en Morelia.				
Mes	Temp. Promedio máximo.	Temp. Promedio mínimo.	Temp. media	Precipitación
Enero	22 °C	6 °C	14 °C	1.8 mm
Febrero	24 °C	7 °C	16 °C	10 mm
Marzo	26 °C	9 °C	18 °C	10 mm
Abril	28 °C	12 °C	20 °C	10 mm
Mayo	28 °C	13 °C	21 °C	43 mm
Junio	27 °C	14 °C	20 °C	137 mm
Julio	24 °C	13 °C	18 °C	175 mm
Agosto	24 °C	13 °C	18 °C	163 mm
Septiembre	24 °C	13 °C	18 °C	119 mm
Octubre	24 °C	11 °C	17 °C	53 mm
Noviembre	23 °C	8 °C	16 °C	15 mm
Diciembre	22 °C	7 °C	15 °C	13 mm

En los meses de junio, Julio, agosto y septiembre se presentan más lluvias en Morelia, siendo Julio el mes más lluvioso; en los meses de abril y octubre hay pocas lluvias; en noviembre, diciembre, enero y febrero, las lluvias son nulas.

Tabla 21 Precipitación pluvial

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1.8mm	10mm	10mm	10mm	43mm	137mm	175mm	163mm	119mm	63mm	15mm	13mm

