



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera

Tesis Doctoral

Caracterización mecánica de madera sólida y multimaterial, madera-adhesivo-malla, como material compuesto para las aplicaciones en el área de la arquitectura e ingeniería.

Tesis que para obtener el grado de Doctor en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

M.C. Israel Macedo Alquicira

Mesa tutorial:

Director de Tesis

Dr. Francisco Javier Castro Sánchez

Co-Director de Tesis

Dr. Javier Ramón Sotomayor Castellanos



Morelia, Michoacán, febrero 2023

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); a la Coordinación de la Investigación Científica, a la Coordinación del Posgrado de la UMSNH; y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el financiamiento de la tesis.

A los miembros de la mesa sinodal: Dr. Francisco Javier Castro Sánchez, Dr. Javier Ramón Sotomayor Castellanos, Dr. Juan Alberto Bedolla Arroyo, Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones y Dr. David Raya González, profesores de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, la Facultad de Arquitectura, la Facultad de Ingeniería Civil, el Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, la Facultad de Ingeniería Química y la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH; así como a la Escuela Nacional de Estudios Superiores de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón; instituciones que participaron en el desarrollo de esta tesis.

A la Facultad de Bellas Artes, de la Universidad de Sevilla, España; en la que se realizó una estancia de investigación como parte del programa de formación del Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera.

A la maestra en Lingüística Hispánica Ximena Mendoza Cortés por apoyo en la revisión y corrección del texto.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Problema de investigación	5
1.2. Justificación.....	6
1.3. Hipótesis	6
1.4. Objetivos	7
 2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	
2.1. Origen de la madera laminada y el uso del adhesivo	8
2.2. Materiales compuestos y/o reforzados	9
2.2.1. Matriz	10
2.2.2. Interfaz	10
2.2.3. Mojabilidad.....	11
2.2.4. Refuerzos	11
2.2.5. Fibra de carbono	11
2.2.6. Fibra de vidrio	11
2.2.7. Malla metálica	12
2.2.8. Laminados compuestos	12
2.2.9. Adhesivos	13
2.2.10. Elementos estructurales	14
2.3. Anisotropía	14
2.4. Variabilidad	14
2.5. Resistencia mecánica	15

2.6. Caracterización con ultrasonido	15
--	----

3. ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Materiales y métodos	16
3.2. Materiales	16
3.2.1. Probetas	16
3.2.2. Contenido de Humedad	17
3.3. Métodos	17
3.3.1. Ultrasonido	17
3.3.2. Ondas de esfuerzo.....	18
3.3.3. Vibraciones transversales	18
3.3.4. Vibraciones en torsión.....	18
3.4. Materiales y métodos	19
3.5. Estrategia de investigación	20

4. INVESTIGACIONES Y RESULTADOS

4.1. Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.....	22
4.2. Madera laminada y madera multimaterial-adhesivo-malla como reemplazo de madera maciza en restauración de edificios históricos	40
4.3. Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de <i>Pinus pseudostrobus</i>	55
4.4 Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos	

dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas	73
4.5. Módulos de rigidez de la madera solida de <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Tabebuia rosea</i> y <i>Quercus scytophylla</i>	87
4.6. Módulo de rigidez del multimaterial de <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Tabebuia rosea</i> y <i>Quercus scytophylla</i>	104
4.7. Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo	118
4.8. Vibraciones transversales para determinar en multimaterial madera-malla-adhesivo su módulo dinámico e índice material (<i>Fagus crenata</i>).....	136
4.9. Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de <i>Fagus crenata</i>	160
4.10. Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas.....	172
4.11. Higroexpansión, higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas	188
4.12. Resistividad eléctrica de la madera de <i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>Tabebuia rosea</i> y <i>Quercus scytophylla</i>	205

5. CONCLUSIONES	216
6. REFERENCIAS	222
7. SÍNTESIS GENERAL	261
8. ANEXOS.....	263
8.1. Constancia de Estancia Doctoral	263
8.2. Constancias de congresos	264
8.3. Artículos publicados.....	288

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Materiales y métodos (estrategia de investigación).	17
Figura 2. Madera sólida; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal.	23
Figura 3. Madera laminada. a) Piezas de madera sólida; b) Capa de adhesivo; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal.	24
Figura 4. Multimaterial. a) Piezas de madera sólida; b) Capas de adhesivo; c) Malla de acero; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal.	24
Figura 5. Densidades y módulos radiales.	30
Figura 6. Densidades y módulos tangenciales.	31
Figura 7. Densidades y módulos longitudinales.	31
Figura 8. Plano radial-tangencial de <i>P. pseudostrobus</i>	34
Figura 9. Plano tangencial-longitudinal de <i>P. pseudostrobus</i>	35
Figura 10. Plano radial-tangencial de una probeta de multimaterial.	36
Figura 11. Madera sólida.	43
Figura 12. Madera laminada.	43
Figura 13. Multimaterial.	44
Figura 14. Prueba de ultrasonido en la dirección longitudinal.	45
Figura 15. Prueba de ultrasonido en la dirección tangencial.	46
Figura 16. Módulos dinámicos en la dirección radial.	50
Figura 17. Módulos dinámicos en la dirección tangencial.	50
Figura 18. Módulos dinámicos en la dirección longitudinal.	51
Figura 19. Factor de calidad.	52
Figura 20. Configuración de las pruebas de ultrasonido. R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; d = Distancia de recorrido.	58
Figura 21. Pruebas de ultrasonido.	60
Figura 22. Correlaciones entre velocidades longitudinales y densidades.	66
Figura 23. Correlaciones entre módulos dinámicos longitudinales y densidades.	66
Figura 24. Dispersiones de módulos dinámicos en función de las densidades a) Dirección radial; b) Dirección tangencial; c) Dirección longitudinal.	70
Figura 25. Pruebas de ultrasonido	76

Figura 26. Configuración de las pruebas de ultrasonido	76
Figura 27. Longitudes de onda en función de las velocidades	83
Figura 28. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural.	92
Figura 29. Cálculo del tamaño de la muestra (n) para la densidad (ρ_{CH}) en función del error aceptable (e).	97
Figura 30. Cálculo del tamaño de la muestra (n) para la frecuencia (f) en función del error aceptable (e).	97
Figura 31. Correlaciones entre el módulo de rigidez (G_{LT}) y la frecuencia (f).	99
Figura 32. Correlaciones entre el módulo de rigidez (G_{LT}) y la densidad (ρ_{CH}).	100
Figura 33. Correlaciones entre los módulos de rigidez (G_{LT}) y las densidades (ρ_{CH})	100
Figura 34. Dispersión del índice material (I_{tor}) en función de la densidad (ρ_{CH}).	101
Figura 35. Índices materiales (I_{tor}) de <i>P. pseudostrobus</i> , <i>T. rosea</i> y <i>Q. scytophylla</i>	102
Figura 36. Probeta de multimaterial. T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.	107
Figura 37. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión.	108
Figura 38. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) y de la densidad (ρ_{CH}) del multimaterial.	112
Figura 39. Correlación del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad	114
Figura 40. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad (ρ_{CH}) para: a) Multimaterial (MM) y b) Madera sólida (ms).	114
Figura 41. Posicionamiento del módulo de rigidez (G_{LT}) del multimaterial (MM) y de la madera sólida (ms).	115
Figura 42. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la frecuencia (ρ_{CH}) para a) Multimaterial (MM) y b) Madera sólida (ms).	116
Figura 43. Probeta de madera sólida	120
Figura 44. Probeta de multimaterial.	121
Figura 45. Pruebas de ultrasonido.	122
Figura 46. Correlación de la densidad del multimaterial (ρ_{ch} mm) en función de la densidad de la madera sólida (ρ_{ch} ms) de <i>P. pseudostrobus</i> , <i>T. rosea</i> y <i>Q. scytophylla</i>	129
Figura 47. Correlaciones de las velocidades del ultrasonido (v_{us}) en función de las densidades (ρ_{ch}) de <i>P. pseudostrobus</i> , <i>T. rosea</i> y <i>Q. scytophylla</i>	130

Figura 48. Velocidad del ultrasonido en <i>Q. scytophylla</i> . mm = multimaterial; t = dirección tangencial; l = dirección longitudinal	131
Figura 49. Velocidad del ultrasonido (v_{us}) para <i>T. rosea</i>	132
Figura 50. Correlaciones de los módulos dinámicos (e_{us}) en función de las densidades (ρ_{ch}) de <i>P. pseudostrobus</i> , <i>T. rosea</i> y <i>Q. scytophylla</i>	133
Figura 51. Configuración de las pruebas de vibraciones transversales	142
Figura 52. Pruebas de vibraciones transversales. Probeta de madera sólida.....	143
Figura 53. Convergencia del tamaño de la muestra (n) en función del error aceptable (e) para la madera sólida de <i>Fagus crenata</i>	149
Figura 54. Convergencia del tamaño de la muestra (n) en función del error aceptable (e) para el multimaterial madera-malla-adhesivo.	149
Figura 55. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de la madera sólida (<i>Fagus crenata</i> ms) y el multimaterial.	151
Figura 56. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la frecuencia (f) de la madera sólida (<i>Fagus crenata</i> ms) y el multimaterial.	152
Figura 57. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía.	154
Figura 58. Dispersión del índice material (I_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía.	155
Figura 59. Posicionamiento del multimaterial madera-malla-adhesivo respecto a la madera sólida (ms) de <i>F. crenata</i>	157
Figura 60. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión.....	164
Figura 61. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de <i>F. crenata</i>	168
Figura 62. Posicionamiento del módulo de rigidez (G_{LT}) de la madera sólida y del multimaterial de <i>F. crenata</i> en función de la densidad.	169
Figura 63. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la frecuencia (f) de <i>F. crenata</i>	170
Figura 64. Contenido de humedad (CH) en función del tiempo en las pruebas de higróscopía.	174
Figura 65. Correlaciones entre del punto de saturación de la fibra y la densidad básica. ..	180

Figura 66. Correlaciones entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica. ..	182
Figura 67. Correlaciones entre porcentaje de pared celular y densidad básica.	184
Figura 68. Correlaciones entre porcentaje de espacio vacío y densidad básica.	184
Figura 69. Correlaciones entre higror expansión radial y densidad básica.	196
Figura 70. Correlaciones entre higror expansión tangencial y densidad básica.	196
Figura 71. Correlaciones entre higror contracción radial y densidad básica.	198
Figura 72. Correlaciones entre higror contracción tangencial y densidad básica.	199
Figura 73. Correlaciones entre relación de anisotropía de higror expansión y densidad básica.	200
Figura 74. Correlaciones entre relación de anisotropía de higror contracción y densidad básica.....	201
Figura 75. Configuración de las pruebas de resistividad eléctrica.....	208
Figura 76. Posicionamiento de la resistencia eléctrica de la madera medida en la Dirección longitudinal.....	210
Figura 77. Comparación de la resistividad eléctrica	214

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estrategia de investigación.....	18
Tabla 2. Densidades, contenidos de humedad, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos.	27
Tabla 3. Relaciones de anisotropía y longitudes de onda.	33
Tabla 4. Densidad, contenido de humedad, velocidad de onda, módulo dinámico y factor de calidad.	47
Tabla 5. Resultados pruebas de ultrasonido.	61
Tabla 6. Resultados pruebas estadísticas.	62
Tabla 7. Datos de la bibliografía (Sotomayor <i>et al.</i> , 2010b).	68
Tabla 8. Longitudes de onda y distancias de recorrido del ultrasonido.	71
Tabla 9. Densidades, velocidades y módulos dinámicos	78
Tabla 10. Tamaños necesarios de las muestras	79

Tabla 11. Coeficientes de determinación	80
Tabla 12. Relaciones de anisotropía y longitudes de onda	82
Tabla 13. Datos de densidades, módulos de rigidez de la bibliografía e índices materiales.	88
Tabla 14. Resultados de las pruebas de vibraciones en torsión	95
Tabla 15. Resultados del cálculo del tamaño de la muestra.	99
Tabla 16. Datos de densidades y módulos de rigidez de la bibliografía	105
Tabla 17. Resultados pruebas de normalidad y de verificación y análisis de varianza.	111
Tabla 18. Resultados pruebas de torsión.	112
Tabla 19. tamaño de la muestra.	125
Tabla 20. Resultados análisis estadístico de las velocidades del ultrasonido.	125
Tabla 21. Resultados de densidad y pruebas de ultrasonido	127
Tabla 22. Densidad, módulo dinámico e índice material de maderas mexicanas	140
Tabla 23. Tamaño de las muestras	148
Tabla 24. Densidad, frecuencia, módulo dinámico e índice material de madera sólida y multimaterial.	150
Tabla 25. Datos de la bibliografía de la densidad y del módulo de rigidez.	161
Tabla 26. Resultados pruebas de normalidad, verificación y análisis de varianza	166
Tabla 27. Resultados pruebas de torsión	167
Tabla 28. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados.	175
Tabla 29. Densidad básica y características higroscópicas.	177
Tabla 30. Coeficiente de variación (entre paréntesis) para el contenido de humedad y la densidad básica.....	178
Tabla 31. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados	190
Tabla 32. Densidad básica y contenido de humedad inicial.	192
Tabla 33. Higroexpansiones, higrocontracciones y relaciones de anisotropía.	194
Tabla 34. Resultados del análisis estadísticos de la resistividad eléctrica	211
Tabla 35. Densidad, contenido de humedad y resistividad eléctrica.....	213

GLOSARIO DE TERMINOS

MOE: Modulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad o también conocido como módulo de Young, es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

MOR: Modulo de ruptura

Es una medida de la resistencia de un espécimen antes de la ruptura. Se puede usar para determinar la resistencia general de una especie de madera; a diferencia del módulo de elasticidad, que mide la deflexión.

CH: Contenido de humedad

Se define como el peso del agua contenido en la madera y referido al peso seco de la misma. Por lo general es expresado en %.

MM: Milímetros

El milímetro (símbolo mm) es una unidad de longitud. Es el tercer submúltiplo del metro y equivale a la milésima parte de él.

M: Metros

Unidad de longitud del sistema internacional, que originalmente se estableció como la diezmillonésima (10^{-7}) parte del cuadrante del meridiano terrestre, y hoy, con más precisión, se define como la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo. (Símbolo m).

Hz: Hertz

Puede referirse a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemán pionero en demostrar la existencia de radiación electromagnética. El Hertz, Hertzio, hercio o Hz es una unidad de frecuencia física usada para medir la frecuencia de ondas y vibraciones de tipo electromagnético.

(número de veces que se repite por segundo cualquier fenómeno) electromagnética. Cada unidad equivale a un ciclo por segundo.

Ondas de esfuerzo:

Se realizan con la finalidad de detectar daños y variaciones en las propiedades mecánicas de una estructura; combinando aspectos de emisión acústica a través de la caracterización ultrasónica de los materiales.

Vibraciones:

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia.

Módulo dinámico:

Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal.

Módulo de rigidez:

El módulo de rigidez, o el módulo de cizallamiento, se utiliza para determinar qué tan elásticos o flexibles serán los materiales si se cortan, que se empujan en paralelo desde lados opuestos. Esta propiedad se convierte en la parte útil de muchos cálculos y se denomina coeficiente de elasticidad durante el cizallamiento. Comprender el módulo de rigidez ayudará a seleccionar el material correcto para usar en la construcción en muchas circunstancias. Cuanto menor sea la fuerza, más fácil se doblará el material, el módulo de rigidez se relaciona con los átomos que se deslizan unos sobre otros. Esto ayuda a explicar por qué la temperatura y la presión también lo afectan. Cuanto más frío es un objeto y más presión está bajo, más rígido o rígido se vuelve.

Velocidad ultrasónica:

Es una propiedad particular de los materiales que ha sido ampliamente utilizada para su caracterización. Este parámetro se ha empleado para estimar, por ejemplo, el tamaño de grano en

acero inoxidable austenítico y el módulo de elasticidad en materiales porosos, entre otros.

Longitud de onda:

Longitud de onda. En física, se conoce como longitud de onda la distancia que recorre una perturbación periódica que se propaga por un medio en un ciclo. La longitud de onda, también conocida como periodo espacial es la inversa de la frecuencia. La longitud de onda se suele representar con la letra griega λ .

Densidad:

Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo por metro cúbico (kilogramo(s) por metro cúbico).

Anisotropía:

La anisotropía (opuesta de isotropía) es la propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas.

Caracterización:

Es una disciplina de la Ciencia de los Materiales que permite estudiar, clasificar y analizar sus propiedades físicas, mecánicas, ópticas, químicas, térmicas y magnéticas. Es decir, la caracterización de materiales sirve para obtener distintos parámetros que sirven para distintas aplicaciones.

Frecuencias:

El número de veces que un ciclo de movimiento completo tiene lugar durante el período de un segundo se denomina Frecuencia y se mide en hercios (Hz).

Ecuaciones en equilibrio:

Se considera momento en equilibrio cuando un elemento o prisma contiene direcciones con dimensiones en X, Y y Z sobre el eje que pasa por su centroide paralela al eje x.

RESUMEN

Los materiales compuestos se han destacado por su aumento de propiedades tanto físicas como mecánicas, dependiendo el caso, a su vez se ha demostrado su alto grado de uso en las áreas y/o ciencias tales como lo es la química, la ingeniería, la metalurgia, por mencionar algunas. En la presente investigación se determinó como material compuesto a la combinación de la madera, adhesivo y malla metálica, denominándolo como multimaterial, con la finalidad de modificar y perfeccionar las propiedades mecánicas de la madera, y con el objetivo de disminuir su variabilidad natural, homogenizando sus propiedades, para un uso ingenieril, arquitectónico y como material compuesto.

Las especies utilizadas en la investigación fueron *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla* y *Fagus crenata*. Se procedió a elaborar el material compuesto (multimaterial) con la combinación de aglutinantes (adhesivo) y malla metálica, posteriormente se realizaron pruebas de caracterización dentro del laboratorio mecánica de la madera y así determinar el comportamiento del material antes y después de ser sometido al tratamiento, consecutivamente se realizó un análisis y se hizo una comparativa de los resultados adquiridos.

Las pruebas que se realizaron para sustentar la presente investigación fueron por métodos no destructivos, como es la prueba de ultrasonido, de vibraciones transversales, de vibraciones longitudinales, la prueba ondas de esfuerzo, así como la determinación de la higoexpansión y la higocontracción en las especies mencionadas y la configuración determinada, también se llevó a cabo una prueba de resistividad eléctrica en la madera sólida y en el multimaterial, esto con la finalidad de evaluar su comportamiento. De acuerdo con estas pruebas existe un incremento en las propiedades mecánicas y físicas del multimaterial, disminuyendo la variabilidad con respecto a la madera natural e incrementando sus propiedades.

Palabras clave: multimaterial, variabilidad, caracterización, material compuesto, pruebas no destructivas.

ABSTRACT

Composite materials have stood out for their increase in both physical and mechanical properties, depending on the case, in turn their high degree of use has been demonstrated in areas and/or sciences such as chemistry, engineering, metallurgy, to mention a few. In the present investigation, the combination of wood, adhesive and metal mesh was determined as a composite material, calling it multimaterial, with the purpose of modifying and perfecting the mechanical properties of wood, and with the aim of reducing its natural variability, homogenizing its properties, for engineering and architectural use and as a composite material.

The species used in the research were *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea*, *Quercus scytophylla* and *Fagus crenata*. We proceeded to elaborate the composite material (multimaterial) with the combination of binders (adhesive) and metal mesh, later characterization tests were carried out in the wood mechanics laboratory and thus determine the behavior of the material before and after being subjected to treatment, consecutively an analysis was carried out and a comparison of the acquired results was made.

The tests that were carried out to support the present investigation were by non-destructive methods, such as the ultrasound test, transverse vibrations, longitudinal vibrations, the stress wave test, as well as the determination of hygroexpansion and hygrocontraction in the species mentioned and the determined configuration, an electrical resistivity test was also carried out on solid wood and multimaterial wood, this in order to evaluate its behavior. According to these tests, there is an increase in the mechanical and physical properties of the multimaterial, decreasing the variability with respect to natural wood and increasing its properties.

1. INTRODUCCIÓN

El fin que persigue esta investigación titulada “Caracterización mecánica de madera sólida y multimaterial madera-adhesivo-malla” tiene el propósito de dar solución a la problemática de escasez de madera con propiedades físicas y mecánicas para el uso ingenieril, donde la anisotropía y la variabilidad son factores que impiden la aplicación de manera generalizada de este material. La investigación comprende un análisis de caracterización de la madera sólida, laminada y un multimaterial, por medio de ensayos destructivos como no destructivos, con el fin de estudiar sus propiedades físicas y mecánicas.

Existen en el mercado diversos materiales compuestos multicapa y poliméricos, tipo sándwich, que han sido aplicados en la industria naval, por mencionar algunas, donde actualmente hay un interés por los materiales verdes y composites naturales, como es la madera, para las nuevas soluciones ingenieriles. Europa, por ejemplo, es uno de los pocos países que desde 1990 ha impulsado esta corriente, por otro lado, Estados Unidos incorpora cambios normativos en el año 2015, mientras que Chile después de un tiempo transcurrido en el 2016 retoma nuevamente este camino. Chile por sus amplias hectáreas de bosque en plantación cuenta con 2,447,591 hectáreas de bosques y una producción de madera aserrada de 7,998,781 m³ (INFOR, 2014), lo que los coloca entre los 10 países de mayor producción mundial. En estructuras de madera las uniones constituyen un factor esencial para el buen desempeño resistente y funcional de la construcción.

En México, en el área de Tecnología de la Madera no existe una propuesta con estas características de material compuesto a base de madera de especies mexicanas (INFOR, 2014). Otro punto importante se debe a la tala desmedida de los bosques mexicanos en diferentes zonas lo que a su vez provoca el desabasto de material primario para su aprovechamiento en la construcción, restauración de edificios históricos o como uso de material estructural en las diferentes industrias (Tamarit U., *et. al* ,2021).

Por los agregados que la constituyen, la madera es considerada como uno de los materiales

compuestos de manera natural. La lignina es uno de sus principales componentes, y tiene la función de aglutinante de las fibras o traqueidas. Esta misma, al ser combinada con otros materiales es una tendencia tecnológica en el campo de la ingeniería en tecnología de la madera (Tamarit U., *et. al* ,2021). En la actualidad, es usual combinar dos o más materiales debido a la respuesta positiva en sus propiedades físicas y mecánicas. La madera como un material heterogéneo, cuyo comportamiento en el área mecánica y física es muy variante. Combinada con otros materiales, la madera es probablemente uno de los menos estudiados dentro del área tecnológica de la madera y de los materiales (Faraldos Marisol y Goberna Consuelo, 2011).

Cuando se fabrica un material de uso industrial o del área de la construcción se genera un porcentaje de consumo energético lo que daña directamente la atmósfera de la corteza terrestre, sin embargo, uno de las ventajas que tiene la madera al ser aserrada comparada con los materiales se encuentra por debajo de los estándares de fabricación del algún material (Madera y Construcción, 2017). De acuerdo con la teoría de los materiales compuestos, la propuesta de configuración del multimaterial, se encuentra clasificado entre los materiales reforzados con fibras multicapa, de manera más precisa en el área de los materiales laminados macroscópicos. El objetivo es mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, obtener alta resistencia, un bajo costo y disminuir su peso (Madera y Construcción, 2017).

Uno de los propósitos de la investigación fue caracterizar el material sólido y el multimaterial por medio de métodos no destructivos y destructivos, en los que se obtuvieron datos de las propiedades físicas y mecánicas, para conocer el comportamiento del material. Asimismo, la investigación pretende contribuir en el estudio de los materiales compuestos, utilizando materiales homogéneos y heterogéneos, en dicha área existe una amplia línea de investigación para trabajos futuros en el área tecnológica de la madera (Faraldos Marisol y Goberna Consuelo, 2011).

Hacer un análisis de los datos experimentales permitirá la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera sólida y laminada (compuesta), por medio de ensayos no destructivos y destructivos. Se han realizado diferentes técnicas no destructivas para detectar daños en materiales compuestos mayormente en metal, lo que se ejecutó en el presente proyecto fue aplicar esas técnicas al material orgánico compuesto.

Las especies estudiadas fueron *Pinus pseudostrobus* L., *Tabebuia rosea* (rosa morada) y *Quercus scytophylla* (encino). El *Pinus pseudostrobus* L. por el tipo de traqueida, siendo una de la más utilizadas en el área de construcción por la facilidad de obtención y abundancia en la mayor parte de la República Mexicana. El *Quercus scytophylla* por sus propiedades anatómicas y mecánicas en el de reforzamiento del material compuesto, por la resistencia de la madera esta depende de su estructura anatómica, el tipo y función de cada una de las células, como la dirección y acomodo de las fibras, longitud y diámetro. La *Tabebuia rosea* la madera es utilizada en decoración de interiores de muebles finos, pisos, gabinetes, chapas decorativas, construcción de botes, ebanistería, ruedas para carretas, artesanías, cajas y embalajes.

La investigación se encuentra dividida en capítulos. En el primero, se explica el problema de la investigación, así como hipótesis y objetivos a partir de los cuales se trabajó. En el segundo define conceptos básicos y establece las bases teóricas para el desarrollo de la investigación. En el tercer capítulo se detallan las estrategias de la investigación aplicadas en la investigación, mientras que en el cuarto se recopila la información de las pruebas realizadas en el material sólido y laminado en las diferentes etapas, para los capítulos cinco, seis y siete está estructurado, en síntesis, conclusiones y referencias, por último, en el capítulo ocho se encuentra implícitos los anexos, estructurados con la producción que se generó en el tiempo que duró el programa doctoral.

1.1. Problema de investigación.

La madera es un material biodiverso, heterogéneo y anisotrópico; para utilizarla como un material de ingeniería, al igual que en el diseño industrial y arquitectónico, se requiere de sus características tengan uniformidad. Parte de la problemática está relacionada, de manera directa, con el hecho que los diámetros de los árboles de especies maderables son cada vez más pequeños, en consecuencia, las piezas de madera sólida con dimensiones de empleo para aplicaciones industriales son más escasas.

Respecto a la madera sólida un problema técnico es la variabilidad en las magnitudes de sus módulos dinámicos entre especies, al interior de una misma especie y aun entre piezas de madera aserradas de un mismo árbol. Una posible solución tecnológica ante esta problemática es la

elaboración de piezas de un multimaterial con dimensiones y características similares a las de madera sólida, que puedan sustituirla como material de ingeniería.

La contribución de esta investigación es la propuesta de un multimaterial que tiene una amplia diversidad de aplicaciones tanto en el área de restauración en los edificios históricos, como en la construcción de puentes, naves industriales, armaduras, muebles, barcos, carros, embalaje, etc, por mencionar algunos.

1.2. Justificación

La pertinencia del tema de estudio radica en llevar la tecnología desarrollada en el laboratorio a posibles aplicaciones a nivel industrial. Las aplicaciones prácticas de los resultados se pueden implementar en el diseño ingenieril, arquitectónico y/o área de restauración y en el área de los materiales. Además, el multimaterial encontrará aplicación en la industria mueblera, automotriz y de construcción naval. Las perspectivas de investigación y/o desarrollo tecnológico son el estudio de especies, dimensiones y sus combinaciones madera-adhesivo-malla, para optimizar el proceso de elaboración.

1.3. Hipótesis.

Hipótesis 1. El módulo de elasticidad de la madera sólida, aumenta si esta se transforma en un multimaterial compuesto de madera sólida, adhesivo y malla. Es verificable si se determina el módulo de elasticidad en la madera sólida y se compara con las mediciones con el multimaterial.

Hipótesis 2. La variabilidad de la densidad y del módulo de elasticidad del multimaterial disminuye comparativamente con el de la madera sólida. Se puede verificar si se miden velocidades de onda en las direcciones de anisotropía en la madera sólida y se comparan con mediciones similares en el multimaterial, a la vez que se comparan y calculan los coeficientes de variación de las densidades y de los módulos dinámicos de ambos materiales.

Hipótesis 3. La anisotropía del módulo de elasticidad del multimaterial disminuye

comparativamente con la de la madera sólida. Es verificable con las pruebas de vibraciones transversales y ultrasonido.

1.4. Objetivos.

Objetivo general:

Caracterizar la madera sólida y el multimaterial elaborado de una misma especie, empleando métodos no destructivos.

Objetivos particulares:

1. Elaborar probetas de madera sólida y multimaterial empleando tres especies, *Pinus pseudostrobus* L., *Tabebuia rosea* (rosa morada) y *Quercus scytophylla* (encino), así como una cuarta especie *Fagus Crenata*, que sirvió de apoyo en pruebas de laboratorio.
2. Determinar la densidad, la velocidad de onda y/o la frecuencia en las direcciones radial, tangencial y longitudinal en la madera sólida y multimaterial.
3. Determinar el módulo dinámico y los coeficientes de variación.
4. Calcular las relaciones de anisotropía en la madera sólida y el multimaterial.

2. ANTECEDENTES Y MARCO TEORICO

2.1 Origen de la madera laminada y el uso del adhesivo

La madera estructural ha sido considerada desde siglos pasados en edificaciones góticas como estructuras principales de las naves de los edificios arquitectónicos de esas características, años más tarde surge la madera laminada estructural en el siglo XVI con el arquitecto Filiberto de l'Orne (1515-1570) utilizando como adherente las bridas, pernos y clavos de hierro forjado. (García *et al.*, 2002), menciona que después de un estudio sobre los pegamentos usados en estas laminaciones las industrias químicas decidieron estudiar los pegamentos haciendo una sustitución de las bridas, pernos y clavos que se utilizaban. Más tarde en el siglo XIX el coronel Francés Emy, ideó una solución para la fabricación de formas curvas mediante tablas de madera acopladas en sentido horizontal, y trabadas mediante pasadores metálicos. Dicha técnica se utilizó en la Basílica de Nuestra Señora de la Salud en Pátzcuaro en 1872 – 1883. También se aplicó en la Estación de Ferrocarril de Dieppe (en Francia) (García, 2002).

Los principios de la madera laminada tuvieron origen en Europa en 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). 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.

En México, se continúa usando la madera en estructuras de forma tradicional y no es posible encontrar ejemplos de estructuras en este estilo de utilización del material y de un compuesto de madera metal. Se han llevado a cabo diferentes trabajos en los estilos arquitectónicos contemporáneos y modernos en edificaciones históricas haciendo uso de la madera como una

estructura principal, las estructuras requieren una reparación y/o sustitución de la misma debido al daño generadas por uso (carga viva y muerta).

El primer país donde este producto tuvo un espectacular desarrollo fue Suiza, en el año de 1920 existían más de 200 edificios con viga o arcos de tipo Hetzer. Más tarde en Estados Unidos Max Hanisch fue el responsable de la introducción de la tecnología de la madera laminada en 1934 empleando arcos de madera laminada encolada con adhesivos. En 1952 los fabricantes más importantes de estructuras de madera, tanto de laminada como de aserrada, unieron sus fuerzas y crearon el American Institute of Timber Construction (AITC). Esta Asociación Nacional Técnica fue creada para normalizar la industria y para su promoción (Guerrero, 2014).

El surgimiento de la madera laminada encolada permitió ofrecer mejor respuesta estructural al presentar una mayor rigidez frente a las uniones mecánicas laminadas, permitiendo una mayor libertad formal por la facilidad de realizar piezas curvadas.

2.2 Materiales compuestos y/o reforzados

Los materiales compuestos son mezclas de dos a más materiales monofásicos de procedencia diferente, y se diferencian por su forma y composición, y están formados por dos componentes diferenciados: la matriz y el refuerzo, (Quesadas-Solís. K., Alavarado-Aguilar. P., Sibaja-Ballesteros, R., y Vaega-Baudrit, J., 2005).

Se considera material compuesto cuando: este se encuentra conformado por dos o más materiales químicamente diferentes y separable mecánicamente, las propiedades del compuesto deben ser superiores al de los componentes individuales y posiblemente únicas en el fin aspecto específico. Los más usados con lo que se encuentran constituidos por dos fases diferentes a nivel atómico o molecular y separables mecánicamente conocidas como matriz y refuerzo que pueden ser de forma de partículas, fibras y laminas, (Saxena, A., Schaffer, J., Antolovic, S., y Sanders, T., 2000).

El mercado estadounidense representa 47% de la fabricación de materiales compuestos, seguido por Europa con un 28%, Asia con 23% y por último América del Sur con un 2%, (Beguin, J., 2011, octubre).

Una estrategia favorecida para reforzar piezas de madera es el uso de carbón fiber reinforced polymer (CFRP). Schober *et al.* (2015) proponen CFRP para reparar y reforzar estructuras de madera. Para mejorar la resistencia mecánica de piezas de madera, (Corradi *et al.*, 2015) incorporan CFRP en piezas de madera solida de Castañee sativa, mientras que (Nadir *et al.*, 2016) lo hicieron en madera laminada de Hevea brasiliensis. (Reis *et al.*, 2018) recomiendan la técnica de barras embebidas de CFRP para reforzar vigas de madera.

Particularmente, en trabajos de edificios históricos, (Nowak *et al.*, 2013) incorporan CFRP para reforzar vigas de *Pinus sylvestris* para restaurar la capacidad de carga de vigas de madera. Chang (2015) revisa diferentes técnicas de refuerzo y reparación para columnas y muros de madera, mientras que Gubana (2015) hizo lo mismo para pisos de madera. (Rescalvo *et al.*, 2017) y (Rescalvo *et al.*, 2018) emplean diferentes configuraciones de CFRP para reforzar madera antigua de *Pinus sylvestris* y analizar el incremento en la resistencia mecánica.

2.2.1 Matriz

Es la fase continua del material, otorga consistencia y continuidad al material, sus funciones son de aglutinar, transferir las cargas aplicadas, proteger la superficie de los refuerzos, proveer el refuerzo de una barrera contra los efectos del medio ambiente, este material influye en las propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del compuesto (Besednjak, 2005).

2.2.2 Interfaz

Es la que garantiza la unión de los materiales correctamente para que el material de refuerzo proporcione o mejore las propiedades físicas y mecánicas. Existen tres tipos de interfaz: metálica, cerámica y polimérica. Será esta que genere las propiedades del material dependiendo de la capacidad de mojabilidad de la matriz (Da Costa, 2000).

2.2.3 Mojabilidad

Es la capacidad de la matriz de mojar o extenderse sobre el refuerzo, es decir que realmente el material matriz y el material refuerzo, tengan una superficie de contacto total o casi total para lograr maximizar las propiedades deseadas (Da Costa, 2000).

2.2.4 Refuerzos

Los refuerzos pueden ser partículas largas o cortas, estos proporcionan resistencia y rigidez al material compuesto la disposición de las fibras cortas puede proveer isotropía mecánica al compuesto, caso contrario si el refuerzo se encuentra de forma homogéneo, el efecto reforzante es generalizado, pero de tipo anisotrópico debido a la orientación de las fibras (Diez, 2011).

2.2.5 Fibra de carbono

Es muy usado en aplicaciones estructurales donde se requieren altas resistencias al fuego o en aquellas situaciones en las que es necesario un buen comportamiento mecánico bajo condiciones estáticas (Gracia, 2007).

Considerado uno de los materiales compuestos más ligeros que cualquier metal, con una resistencia muy similar y ventajas sobre el metal que es inmune a la corrosión. Además, tiene la peculiaridad de adaptarse a cualquier forma y necesidad, baja densidad, estabilidad dimensional, alta resistencia a la fatiga, conductividad eléctrica, una de las desventajas que posee al momento de elaborarlo requiere de equipos especializados lo cual aumenta su costo de producción (Solano y Ramírez, 2014).

2.2.6 Fibra de vidrio

Es uno de los materiales más usados para refuerzos en la fabricación los materiales compuestos en aplicaciones aeronáuticas, por su alta disposición, bajo costo y propiedades mecánicas superiores al acero. Tiene características como alta resistencia mecánicas, es buen aislante térmico,

permeabilidad eléctrica y magnética, es incombustible por naturaleza, bajo coeficiente de dilatación térmica, alta estabilidad dimensional, poco sensible a los cambios térmicos, es inerte a la acción biológica por lo tanto no sufre alteraciones y no se pudre, y baja conductividad térmica, esto por mencionar algunas características de este material (Diez, 2011).

2.2.7 Malla metálica

Zhou *et al.* (2011) reportan resultados sobre la incorporación de malla de acero galvanizado para reforzar madera. Marzi (2015) revisa la prospectiva de materiales nano-estructurados para la protección y refuerzo de estructuras de madera. (Byeon *et al.*, 2016) investigan elementos estructurales híbridos de madera y otros materiales. (Togay *et al.*, 2017) proponen reforzar elementos estructurales con malla de aluminio. (Rangavar, 2017) reporta propiedades físicas y mecánicas de tableros de cemento-madera reforzados con malla de acero, mientras que (Kohl *et al.*, 2017) caracterizan en condiciones dinámicas multimateriales a base de madera y los proponen como sustitutos de piezas de madera sólida.

Existen en el mercado diferentes mallas de origen metálico de acero inoxidable como acero galvanizado, formado por dos hilos metálicos en sentidos opuestos, creando un entramado y posee características de ser ligeras, bajo costo y flexibilidad.

2.2.8 Laminados compuestos

Son formados a partir del apilamiento de láminas o fibras orientadas en una o varias direcciones y son impregnadas con resinas termoestables. Existen tres tipos de láminas:

- Lamina unidireccional: en este las fibras están orientadas en una única dirección, se considera que este tipo de lámina existe isotropía transversal.
- Lamina bidireccional: fibras orientadas en dos direcciones opuestas (perpendiculares).
- Lamina tipo tejido: todas las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí. La urdimbre (fibra longitudinal) esta entrelazada con la trama (fibra transversal) se considera que existe ortotropía en este tipo de lámina.

Lamina tipo mat (tejido mat): compuesta por fibras cortadas orientadas aleatoriamente para formar una lámina, (Miravete A. 2012).

2.2.9 Adhesivos

Los adhesivos empleados son a base de urea formaldehído, urea resorcinol y urea melamina, todos de dos componentes y de curado en frío, con uso de catalizadores de resina. Los adhesivos vinílicos no son aptos para la fabricación de madera laminada estructural porque no resisten las solicitudes habituales de los elementos estructurales.

El adhesivo de urea formaldehído es el más económico. Tiene una moderada resistencia a la Re humidificación temporaria. Es utilizable en taller con temperaturas no inferiores a los 10°C. El mejor adhesivo para usos exteriores y el más utilizado por los fabricantes europeos, es la urea resorcinol. Requiere una temperatura de trabajo superior y es bastante más costoso que la urea formaldehído. La urea melamina es también muy resistente a la acción de la humedad sin serlo tanto como el adhesivo de resorcinol y suele ser utilizado cuando se desea evitar las líneas de cola oscuras de la resorcina.

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, (2009), establece que la resina epóxica es polímero termoestables y termo endurecibles que contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glicidas, sus principales características son la dureza que es superior a otros adhesivos, estas pueden soportar temperaturas más altas que las resinas de poliéster, excelente adherencia a las fibras, resistentes a los ataques de álcali, baja contracción durante la polimerización, entre otras características más.

Jasieńko y Nowak (2014) reforzaron vigas de madera nueva y antigua con el objetivo de evaluar diferentes configuraciones de adhesivos epoxi y placas de acero con pruebas de flexión; asimismo, (Franke *et al.*, 2015) reportan diferentes técnicas de refuerzo para vigas dependiendo del tipo u origen de la falla.

2.2.10 Elementos estructurales

Las propiedades de estos elementos compuestos son dependientes de la geometría de los elementos estructurales, el compuesto laminar es uno de los compuestos más comunes está conformado por laminas que tiene una dirección preferencial en resistencia. Esto consiste en apilar las capas de los materiales a laminar y consolidarlas, de tal manera que en cada una de las láminas y de la orientación en la que son colocadas existe una variabilidad de las fibras entre laminas, incrementando su resistencia ya sea mecánica o física dependiendo el material compuesto formado. (Hull, 2003).

2.3 Anisotropía

Un material es anisotrópico cuando sus propiedades dependen de la orientación según la cual se hace la medición de ellas. Texturas no cristalinas. En materiales como la madera o bien un material compuesto formado por una resina reforzada con fibras de vidrio alineadas, se tendrán propiedades muy diferentes según si se mide a lo largo de las fibras o bien en otra dirección. Ahí hay una forma de anisotropía que se debe a textura por fibras.

Isotropía un material: es isótropo cuando sus propiedades no dependen de la dirección según la cual ellas son medidas. Es decir, cuando una propiedad tiene el mismo valor independiente de la dirección según la cual se hace la medida. Los materiales amorfos (o no cristalinos) son estrictamente isótropos. Ello se debe a que no presentan direcciones que difieran entre sí en su tipo de orden atómico lineal, por no haber orden cristalino (Hull, 2003).

2.4 Variabilidad

Pinus pseudostrobus Lindl. es una especie altamente variable, por lo tanto, (Stead, 1983) evalúa la variabilidad de esta especie donde es uno de los propósitos de la investigación. Esa variabilidad está relacionada directamente con la densidad relativa de la madera, es una de las características genéticas y físicas más estudiadas, por la aparente sencillez de su determinación (Kollmann, 1959).

2.5 Resistencia mecánica

Existe evidencia empírica que la madera reconstituida o reforzada mejora sus características de resistencia mecánica (Schober *et al.*, 2015; Nadir *et al.*, 2016; Kohl *et al.*, 2017). Sin embargo, existe poca información para materiales compuestos de especies mexicanas y para madera reforzada con malla (Togay *et al.*, 2017; Macedo *et al.*, 2019).

2.6 Caracterización con ultrasonido

La tecnología del ultrasonido se aplica en el análisis ingenieril de estructuras históricas de madera para medir la velocidad de onda (Íñiguez-González *et al.*, 2015, Kloiber *et al.*, 2016, Branco *et al.*, 2017, Riggio *et al.*, 2018). Igualmente, el ultrasonido se utiliza en la caracterización mecánica de madera sólida (Tippner *et al.*, 2016) y laminada (Sanabria *et al.*, 2011).

Los parámetros necesarios para la caracterización dinámica de probetas de compuestos de madera son la densidad aparente (Niklas y Spatz, 2010) y la velocidad de onda en las tres direcciones de anisotropía de la madera (Dackermann *et al.*, 2016). Combinando la densidad y la velocidad de onda se determina el módulo dinámico (Gonçalves *et al.*, 2014).

Otro parámetro en el diseño mecánico es el factor de calidad, el cual se emplea igualmente para clasificar y comparar las cualidades de la madera (Spycher *et al.*, 2008). En una madera, un significativo factor de calidad sugiere una mejor resistencia en relación con su densidad y una buena apreciación como material de ingeniería (Ashby, 2011). Estas características están reportadas para la madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en trabajos del Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México (Sotomayor *et al.*, 2010, Sotomayor *et al.*, 2015). Sin embargo, no se encontró información sobre la caracterización de un multimaterial madera-adhesivo-malla caracterizado por ultrasonido.

3. ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Materiales y métodos

Este apartado tiene por objetivo describir el material utilizado en la investigación, así como puntualizar los procesos para la elaboración de un multimaterial a base de madera sólida. Al multimaterial, posteriormente se realizó pruebas no destructivas de ultrasonido, ondas de esfuerzo, vibraciones transversales y vibraciones en torsión. La preparación del material consistió en la elaboración de probetas de pequeñas dimensiones destinadas para las pruebas de laboratorio. Una de las finalidades de la etapa experimental fue la obtención de datos de velocidades de ultrasonido, velocidades de ondas de esfuerzo, módulos de rigidez, módulos dinámicos, MOE y MOR, esto para la madera sólida, laminada y el multimaterial.

El multimaterial es el resultado de un proceso de búsqueda para elaborar un material que incrementara y/o disminuyera las propiedades físicas y mecánicas, de acuerdo a los indicadores favorables para la aplicación del material en sus diferentes ámbitos. La investigación se realizó en diferentes etapas donde fue modificando la estructura, dimensiones y configuraciones de laminado.

3.2 Materiales

3.2.1 Probetas

Para la investigación se procedió a la adquisición de probetas de madera aserrada de especie *Pinus pseudostrobus*, *Quercus scytophylla*, *Tabebuia rosea* y *Fagus crenata*. Se elaboraron dos grupos de 35 probetas de madera sólida y multimaterial. Para el primer grupo se elaboraron 35 probetas de madera sólida con dimensiones 0,01 m × 0,15 m × 0,15 m orientadas en las direcciones radial (espesor), tangencial (ancho) y longitudinal (largo). Para el segundo grupo se elaboraron 35 probetas de multimaterial compuesto de dos elementos de madera acomodados ortogonalmente, más una malla de acero con espesor de 0,92 mm localizada entre las dos maderas. Los tres

componentes son ensamblados con un adhesivo de poliuretano aplicando presión y temperatura hasta que se consolida el multimaterial.

Las dimensiones del multimaterial fueron: 0,02 m de espesor (dos piezas de madera sólida de 0,01 m), ancho 0,15 m y largo 0,15 m. El espesor y el ancho coinciden con las direcciones radial y tangencial. Los dos componentes de madera están colocados con una rotación de 90° respecto a la dirección longitudinal, lo que resulta en un laminado de dos capas cruzadas perpendicularmente. Todas las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C (± 2 °C) y humedad relativa del aire de 65 % (± 1 %) hasta que alcanzaron su contenido de humedad en equilibrio de 10 % para la madera sólida y de 8 % para el multimaterial

3.2.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera (ρ), correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

3.3 Métodos

3.3.1 Ultrasonido

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido a través de las probetas de madera sólida, madera laminada y multimaterial en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Para medir el tiempo de transmisión se empleó el sistema de pulsos de ultrasonido V-METER MK IV™ marca James Instruments. La velocidad del ultrasonido se calculó con la distancia de recorrido dividida entre el intervalo de tiempo.

3.3.2 Ondas de esfuerzo

La prueba de ondas de esfuerzo (O_e), se realizó con un aparato marca *Metriguard®* y consistió en medir el tiempo de transmisión de las ondas de esfuerzo de manera angular. Se realizaron 18 mediciones cada 10 grados, y la primera medición se hizo en la dirección tangencial-tangencial de la probeta ($\theta = 0^\circ$). Posteriormente, se realizó un barrido en el sentido de las manecillas del reloj en los 360° en la superficie de la probeta, cada medición se hizo en el plano tangencial-tangencial, tangencial-longitudinal, longitudinal-longitudinal y longitudinal-tangencial. Después de 18 mediciones consecutivas, la última midió el tiempo de transmisión en la dirección tangencial ($\theta = 90^\circ$). En cada probeta se obtuvieron tres solicitaciones y su promedio se utilizó en los cálculos.

3.3.3 Vibraciones transversales

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el medidor de frecuencia *Grindosonic®*. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso. Las vibraciones fueron registradas con un micrófono y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de 1 Hz. Se realizaron tres impactos y su promedio se consideró como su frecuencia

3.3.4 Vibraciones en torsión

Se utilizó el medidor de frecuencia *Grindosonic®* modelo MKS. El impacto fue aplicado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0,25 del ancho (b) y a 0,25 del largo (l) de cada espécimen. La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0,005%. El módulo de rigidez es rubricado con el subíndice LT para identificarlo como derivado de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

3.4 Materiales y métodos

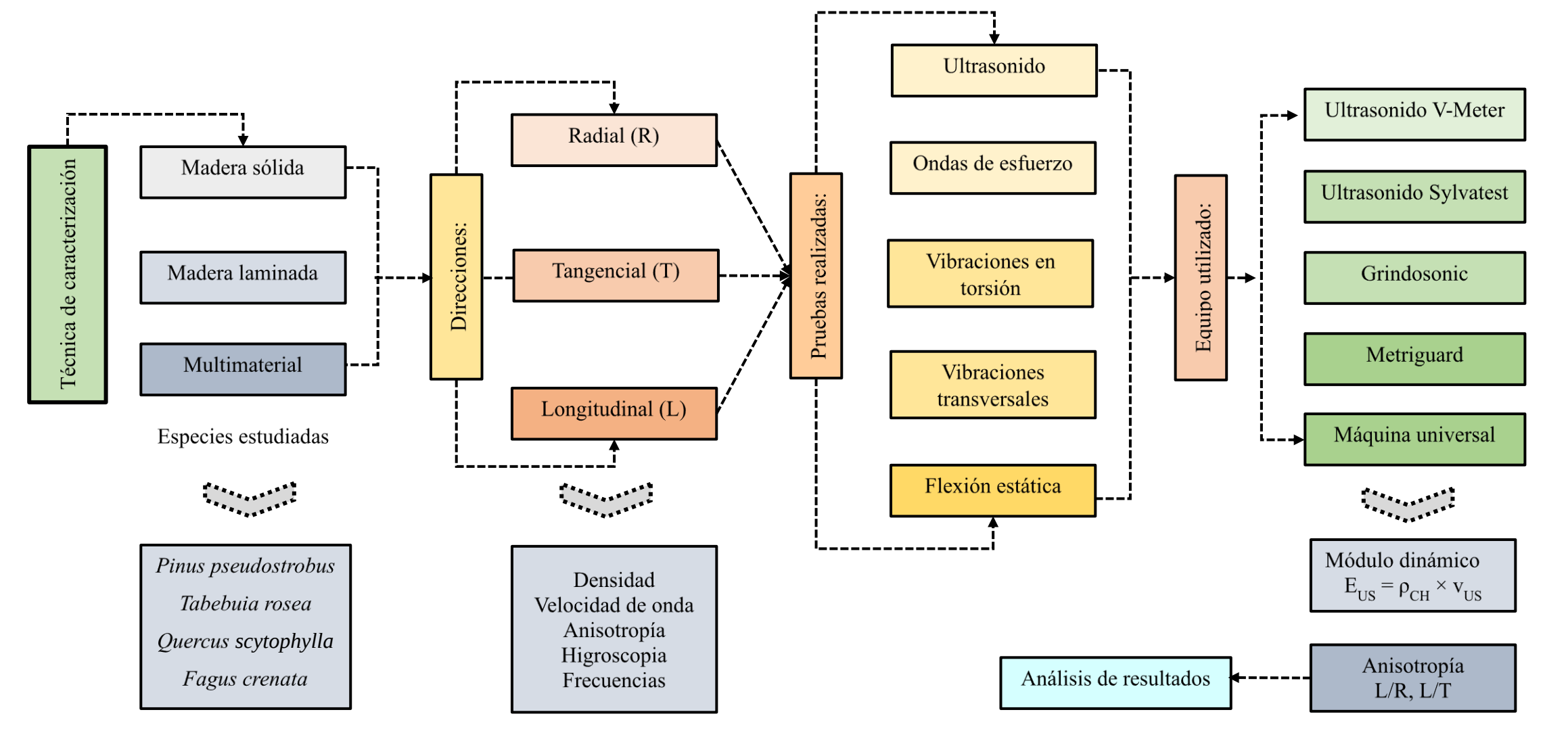


Figura 1. Materiales y métodos (estrategia de investigación)

3.5 Tabla 1. Estrategia de investigación

Capítulo	Artículo	Objetivo Gral.	Objetivo 1	Objetivo 2	Objetivo 3	Objetivo 4	H1: EMM > Ems	H2: CVM < CVms	H3: R, T, L MM < R, T, L ms	Especie	Configuración
4.1.	E _{US}	Si	-	Si	Si	Si	Si	Si	Si	<i>Pinus pseudostrobus</i>	Sólida Laminada Multimaterial
4.2.	E _{US}	Si	-	Si	Si	-	Si	Si	Si	<i>Pinus pseudostrobus</i>	Sólida Laminada Multimaterial
4.3	E _{US}	Si	-	Si	Si	Si	Si	Si	Si	<i>Pinus pseudostrobus</i>	Sólida Laminada
4.4	E _{US}	Si	Si	Si	Si	-	-	-	-	<i>Pinus pseudostrobus</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Quercus</i> spp <i>Paulownia tomentosa</i> <i>Cryptomeria japonica</i> <i>Fagus crenata</i>	Sólida
4.5	G _{TL}	-	Si	Si	Si	-	-	-	-	<i>Pinus pseudostrobus</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Quercus scytophylla</i>	Sólida
4.6	O _c	Si	Si	Si	Si	-	-	-	-	<i>Pinus pseudostrobus</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Quercus scytophylla</i>	Sólida Multimaterial
4.7	G _{TL}	Si	Si	Si	Si	-	Si	Si	Si	<i>Pinus pseudostrobus</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Quercus scytophylla</i>	Sólida Multimaterial
4.8	E _{US}	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	<i>Pinus pseudostrobus</i> <i>Tabebuia rosea</i> <i>Quercus scytophylla</i>	Sólida Multimaterial

4.9	E _{vt}	Si	-	Si	Si	-	Si	Si	Si	<i>Fagus crenata</i>	Sólida Multimaterial
4.10	G _{LT}	Si	-	Si	Si	-	Si	Si	Si	<i>Fagus crenata</i>	Sólida Multimaterial
4.11	MOE, MOR	Si	-	Si	Si	-	-	-	-	<i>Fagus crenata</i>	Sólida Multimaterial
4.12	CH	-	-	Si	-	-	-	-	-	<i>Cupressus lindleyi</i> <i>Cedrela odorata</i> <i>Swietenia macrophylla</i> <i>Tabebuia donnell-smithii</i> <i>Fraxinus uhdei</i> <i>Fagus mexicana</i> <i>Dalbergia palo-escrito</i> <i>Guazuma ulmifolia</i>	Sólida
4.13	CH	-	-	Si	-	-	-	-	-	<i>Cupressus lindleyi</i> <i>Cedrela odorata</i> <i>Swietenia macrophylla</i> <i>Tabebuia donnell-smithii</i> <i>Fraxinus uhdei</i> <i>Fagus mexicana</i> <i>Dalbergia palo-escrito</i> <i>Guazuma ulmifolia</i> .	Sólida
E_{US}: Módulo dinámico, G_{TL}: Módulo de rigidez, O_e: Ondas de esfuerzo, E_{vt}: Modulo de vibraciones transversales, MOE: Módulo de elasticidad, MOR: Módulo de ruptura, CH: Contenido de humedad, H1: hipótesis uno, EMM: Módulo de elasticidad del Mulimaterial, Ems: Módulo de elasticidad de la madera sólida, H2: Hipótesis dos, CVM: Coeficiente de variación en Multimaterial, CVms: Coeficiente de variación en Madera sólida, H3: Hipótesis tres, R: Radial, T: Tangencial, L: Longitudinal, MM: Multimaterial, ms: Madera sólida.											

4. INVESTIGACIONES Y RESULTADOS

4.1. Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en probetas de madera sólida, madera laminada y multimaterial elaboradas con *Pinus pseudostrobus*. Se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Se determinaron las densidades, contenidos de humedad, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos. Se calcularon las relaciones de anisotropía y las longitudes de onda. Los parámetros estudiados son diferentes para cada tipo de material y según la dirección de medición. Los resultados permiten caracterizarlos tres tipos de material en una escala de probetas de pequeñas dimensiones. El pegamento y la malla modifican las magnitudes de la densidad, velocidad y módulo dinámico de la madera laminada y del multimaterial, respecto a las de la madera sólida. Palabras Clave: Densidad de la madera, contenido de humedad, anisotropía, longitud de onda.

Abstract

The objective of the research was to determine the ultrasound speeds and the dynamic modules in solid wood, laminated wood and multimaterial specimens made with *Pinus pseudostrobus*. Ultrasound tests were performed in the radial, tangential and longitudinal directions. Densities, moisture content, ultrasound velocities, and dynamic moduli were determined. Anisotropy ratios and wavelengths were calculated. The parameters studied are different for each type of material and according to the direction of measurement. The results allow to characterize the three types of material on a scale of small specimens. Glue and mesh modify the magnitudes of density, speed and dynamic modulus of laminated wood and multimaterial, compared to solid wood.

Keywords: Wood density, moisture content, anisotropy, wavelength.

Introducción

La madera es un material biodiverso, estructuralmente heterogéneo y mecánicamente anisotrópico. Estas propiedades son consecuencia de la estructura celular específica de cada especie [1]. Sus características físicas requieren uniformidad para utilizarla correctamente como material de ingeniería, así como en el diseño industrial y arquitectónico. La solución tecnológica a este problema es el desarrollo experimental y la producción industrial de madera laminada y reconstituida que aseguren los criterios de confiabilidad estructural y de servicio de una estructura de madera [2].

El proceso de manufactura de productos de madera de ingeniería es una estrategia industrial que reduce y minimiza la influencia de defectos de la madera para la aplicación de criterios de diseño en ingeniería. Se puede obtener un material normalizado y con características de resistencia confiables para su uso en ingeniería, si la madera se combina con adhesivos, y si se modifica su configuración material natural en componentes con geometría apropiada al proyecto de diseño arquitectónico y de ingeniería [3].

Las principales aplicaciones de la madera laminada son la fabricación de columnas, vigas rectangulares y curvas, armaduras tradicionales, armazones para arcos y domos, puentes y naves industriales. Asimismo, una pieza de madera laminada, permite el aprovechamiento de troncos de pequeñas dimensiones e incorporar en su composición, piezas de madera de baja calidad estructural [3].

La madera laminada y pegada encuentra uso como elemento estructural en edificaciones con madera. La norma ASTM D3737-12 [4] 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.” En el contexto de esta investigación, la madera laminada y pegada se denominará únicamente madera laminada.

La reconstitución de la madera se da en varias escalas: tableros aglomerados de fibras, partículas y astillas con adhesivos [5], vigas laminadas y/o reforzadas con polímeros y fibras de carbón [6]

mallado de acero galvanizado [7], materiales nano-estructurados [8] y con mallado de aluminio [9].

La madera aserrada de la especie *Pinus pseudostrobus* Lindl. es utilizada en la fabricación de chapa, empaque y molduras, en la construcción, en la fabricación de ventanas y muebles finos, en artesanías, ebanistería y en pulpa para papel [10]. *P. pseudostrobus* es una especie recomendable para plantaciones comerciales [11] y sus características tecnológicas están reportadas en [12].

Las velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos longitudinales de madera sólida y laminada de *P. pseudostrobus* están reportadas en [13]. Por su parte, en [14] se miden velocidades del ultrasonido y se determinan módulos dinámicos de la madera sólida de *P. pseudostrobus* y de madera laminada y multimaterial elaborados con esta misma especie. Utilizan el medidor de ultrasonido Sylvestest con una frecuencia de emisión de 22 kHz y con sensores de emisión y recepción con diámetro de 0,008 m, lo que permite medir de manera puntual el tiempo de transmisión del ultrasonido en cada capa y/o componente de la madera laminada y multimaterial.

Este trabajo es continuidad de la línea de investigación desarrollada por [14] en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. Sin embargo, en la presente investigación se propone otro enfoque de medición: se emplea el medidor V-Meter MKIV con frecuencia de 54 kHz y con sensores de diámetro de 0,05 m, lo que permite determinar el tiempo de transmisión a través de toda la sección de las probetas. Las mediciones de [14] son útiles para fines analíticos del comportamiento de la madera laminada y multimaterial en comparación con la madera sólida. En cambio, la presente investigación aporta datos integrales para fines de diseño y cálculo ingenieril.

La hipótesis de la investigación propone que los módulos dinámicos en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera laminada son similares a los de la madera sólida. Sin embargo, estos mismos parámetros en el multimaterial son mayores que los correspondientes a la madera sólida y laminada. Para verificar esta hipótesis el objetivo de la investigación fue determinar las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en probetas de los tres tipos especificados empleando madera de *P. pseudostrobus*.

Materiales y métodos

Materiales

Se adquirieron piezas de madera aserrada de *Pinus pseudostrobus* en el municipio de Ichaqueo, Michoacán, México (coordenadas GPS Latitud: 19,5667, Longitud: -101,1458). Se elaboraron tres grupos de 32 probetas cadauno: madera sólida (ms), madera laminada (lam) y multimaterial (MM). Las probetas laminadas y de multimaterial están reconstituidas con dos piezas de madera unidas con un adhesivo de dos componentes de poliuretano (50%-50%), endurecido con una presión de 200 kg cm^{-2} y una temperatura de $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 30 minutos [14]. El multimaterial está reforzado con una malla de acero galvanizado que funciona como estabilizador estructural. En esta investigación, el multimaterial madera-malla-adhesivo se denominará únicamente multimaterial.

La madera y las probetas se secaron antes y después de su fabricación durante 3 meses en una cámara de acondicionamiento con temperatura de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa del aire de 65% ($\pm 2\%$), hasta que alcanzaron su contenido de humedad en equilibrio. Las dimensiones de las probetas fueron: 0,05 m de ancho, 0,05 m de espesor y 0,04 m de largo, extensiones correspondientes a las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera (Figs. 2, 3 y 4).

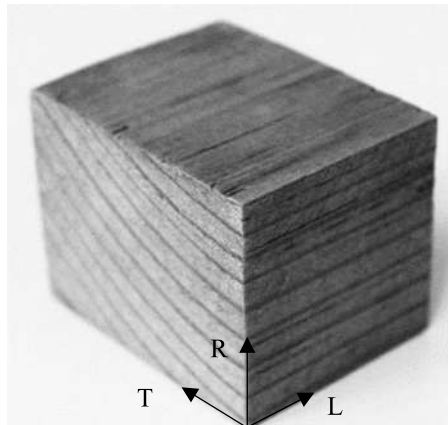


Figura 2. Madera sólida; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal

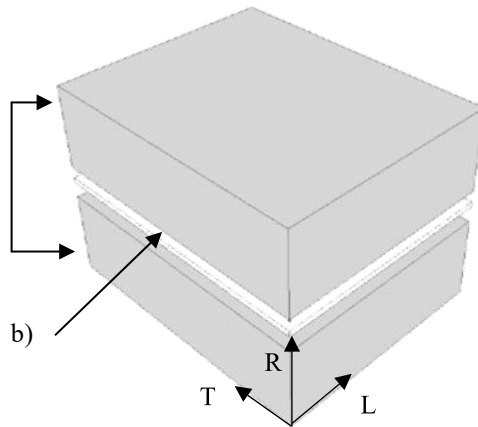


Figura 3. Madera laminada. a) Piezas de madera sólida; b) Capa de adhesivo; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal

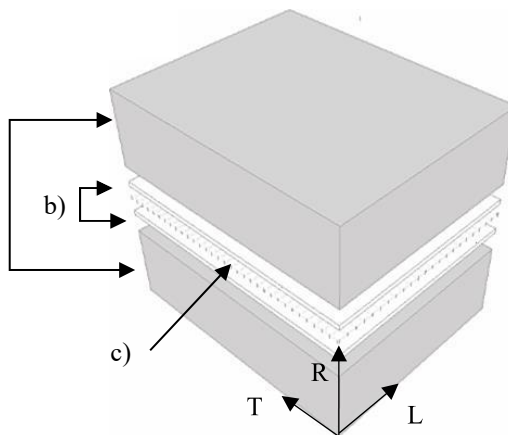


Figura 4. Multimaterial. a) Piezas de madera sólida; b) Capas de adhesivo; c) Malla de acero; R: Radial; T: Tangencial; L: Longitudinal.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [15]. La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [16].

El material proviene del mismo lote de probetas reportadas en [14] pero las probetas son diferentes y elaboradas especialmente para la presente investigación. Así, los resultados aquí reportados son originales e inéditos.

Métodos

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido a través de las probetas de madera sólida (Fig. 2), madera laminada (Fig. 3) y multimaterial (Fig. 4) en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L). Para medir el tiempo de transmisión se empleó el sistema de pulsos de ultrasonido V-METER MK IV™ marca James Instruments. La velocidad del ultrasonido se calculó con la distancia de recorrido dividida entre el intervalo de tiempo.

Los módulos dinámicos se calcularon con la ecuación (1):

$$E_{us} = \rho_{CH} \times v_{us}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_{CH} = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$)

La longitud de onda se calculó con la ecuación (2):

$$\lambda = v_{us} / f \quad (2)$$

Donde:

λ = Longitud de onda (m)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$)

f = Frecuencia del emisor (54 kHz)

Las mediciones de los elementos microanatómicos, así como las fotografías del plano leñoso de *P. pseudostrobus* se realizaron en cubos de 8 cm³ recubiertos con una capa de carbono con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6400 de electrones secundarios y retro-dispersados. Los mapeos fueron en el sentido de las manecillas del reloj.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en tres grupos de 32 probetas de tres materiales: madera sólida, madera laminada y multimaterial. El tipo de material se considera el factor de variación. Las variables de respuesta fueron la velocidad del ultrasonido (v_{us}) y el módulo dinámico (E_{us}) ambas mediciones en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L), totalizando nueve muestras independientes (tres tipos $\times$ tres direcciones).

Para la densidad y el contenido de humedad, así como para cada variable de respuesta se calcularon su media ($\bar{x}$), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($cv = \sigma / \bar{x}$). Para cada dirección se realizaron análisis de varianza (Anova) para un nivel de confiabilidad del 95%. Así, el criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa fueron valores de $P (\alpha = 0,05) < 0,05$.

Se realizaron pruebas de grupos homogéneos con el criterio de demarcación de no aceptar diferencias significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X. Se evaluaron las relaciones de anisotropía entre la dirección longitudinal y/o las direcciones radial y tangencial.

Resultados y análisis

Las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos para la madera sólida, laminada y multimaterial de *P. pseudostrobus* se presentan en la Tabla 1. El contenido de humedad de las tres muestras varía en el intervalo de 10,3% a 11,6% (Tabla 2). Los coeficientes de variación del contenido de humedad al interior de cada muestra varían de 5,1% a 9,6%. En consecuencia, se considera a la madera de *P. pseudostrobus* estabilizada en estado seco y se considera que la

variación del contenido de humedad de las probetas no interviene de manera significativa en los resultados.

Tabla 2. Densidades, contenidos de humedad, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos.

	ρ_{CH}	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$
	(kg m ⁻³)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)
Madera sólida				
$\bar{x}$	571	1692	2352	5553
σ	34	133	133	346
CV	(6,0)	(7,9)	(5,6)	(6,2)
Madera laminada				
$\bar{x}$	579	1821	1932	5685
σ	94	155	236	148
CV	(16,2)	(8,5)	(12,2)	(2,6)
Multimaterial				
$\bar{x}$	614	6184	1869	5534
σ	79	1233	133	251
CV	(12,8)	(19,9)	(7,1)	(4,5)
	CH	Eus R	Eus T	Eus L
	(%)	(MN m ⁻²)	(MN m ⁻²)	(MN m ⁻²)
Madera sólida				
$\bar{x}$	11,6	1670	3214	17896
σ	1,1	294	410	2199
CV	(9,6)	(17,6)	(12,7)	(12,3)
Madera laminada				
$\bar{x}$	10,7	1902	2110	18282
σ	0,5	528	546	3417
CV	(5,1)	(27,7)	(25,9)	(18,7)
Multimaterial				
$\bar{x}$	10,3	23788	2134	18882
σ	0,7	8666	285	3186
CV	(6,8)	(36,4)	(13,3)	(16,9)
ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; E _{us} = Módulo dinámico; = Radial; T = Tangencial; L = Longitudinal; $\bar{x}$ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.				

Para las densidades de los tres tipos de material, las velocidades en las direcciones radial, tangencial y longitudinal y los módulos dinámicos correspondientes, los análisis de varianza indican diferencias estadísticamente significativas ($P(\alpha = 0,05) < 0,05$) entre todos ellos. Caso diferente son los módulos dinámicos longitudinales donde el análisis indica que estos parámetros de los tres materiales son iguales entre sí ($P(\alpha = 0,05) = 0,415$).

En el mismo contexto, las densidades forman dos grupos homogéneos, por un lado, madera sólida y laminada y por otra madera laminada y multimaterial. Las velocidades y los módulos dinámicos, en las tres direcciones de anisotropía, se agrupan para la madera sólida y laminada, pero para el multimaterial es diferente. La excepción son los módulos dinámicos longitudinales que son grupos homogéneos para los tres materiales.

Densidad

La densidad de la madera laminada respecto a la de la madera sólida es 1,5% mayor. Esta diferencia representa el peso del adhesivo que se incorporó para unir las dos piezas de madera. Asimismo, la densidad del multimaterial es 7,5% mayor que la de la madera sólida, diferencia que representa los pesos agregados del pegamento y de la malla. La variabilidad de la densidad expresada por el coeficiente de variación aumenta para la madera laminada un 179% respecto a la de la madera sólida y un 113% del multimaterial.

Los dos tipos de madera reconstituida están elaborados con el mismo lote de madera de *P. pseudostrobus* y su variabilidad debería ser similar. Dado que el peso de la malla difiere poco, posiblemente la variación de la densidad se incrementó al incorporar el adhesivo de manera no uniforme.

Las magnitudes de las densidades son similares a las reportadas en [14] dado que se trata del mismo lote de madera estudiado por estos autores. Igualmente, las densidades son similares a las reportadas para *P. pseudostrobus* en [13].

Velocidad del ultrasonido

La velocidad del ultrasonido radial de la madera laminada es 7,6% mayor que la de la madera sólida. La velocidad del multimaterial es 265% mayor respecto a la de la madera sólida y 240% mayor que la de la madera laminada. Estas diferencias pueden explicarse con los siguientes argumentos: la dirección radial de la madera sólida, en la que viaja el ultrasonido, es perpendicular al plano formado por las direcciones tangencial y longitudinal (Fig. 2). De tal forma que las ondas atraviesan perpendicularmente las capas de crecimiento anual formadas cada una de ellas por tejidos leñosos de diferente porosidad. En el caso de la madera laminada esta continuidad entre capas de crecimiento se interrumpe por la capa de pegamento entre las dos piezas de madera.

Sin embargo, parece que la rigidez local de la unión adhesiva incrementa la velocidad del ultrasonido. Este efecto se amplifica aún más para el multimaterial, donde la unión está compuesta por el adhesivo y la malla de acero galvanizado que incrementa la velocidad en esta dirección.

Para la dirección tangencial, el ultrasonido viaja en paralelo a los planos radial-tangencial formados, las capas de crecimiento, de adhesivo y de la malla. De aquí resulta que la velocidad tangencial de la madera laminada es 17,9% menor que la de la madera sólida. La velocidad tangencial del multimaterial es 20,5% menor que la de la madera sólida y solo 3,3% que la de la madera laminada. En esta dirección la capa central malla-adhesivo disminuye la velocidad del ultrasonido.

La velocidad en la madera laminada siguiendo la dirección longitudinal es 2,4% mayor que la de la madera sólida. Es decir, la capa de pegamento aumenta la velocidad del ultrasonido. La velocidad en el multimaterial es 0,3% menor que en la sólida y 2,7% menor que en la laminada. En esta dirección la capa malla-adhesivo disminuye la velocidad del ultrasonido. Estos argumentos verifican los resultados de las pruebas de grupos homogéneos: las velocidades del ultrasonido se agrupan para la madera sólida y laminada, mientras que la del multimaterial es distinta.

Las velocidades del ultrasonido (Tabla 2) son similares a las reportadas por [19] para *P. pseudostrobus* ($\rho_{CH} = 620 \text{ kg m}^{-3}$) utilizando el mismo aparato para medir el ultrasonido. La densidad de la madera es 8,6% mayor respecto a la de la presente investigación y las dimensiones

de las probetas fueron $R = 0,01 \text{ m} \times T = 0,15 \text{ m} \times L = 0,15 \text{ m}$. De tal forma que sus velocidades son del mismo orden de magnitud, pero difieren según la dirección de medición ($v_{us R} +4,6\%$, $v_{us T} +20\%$ y $v_{us L} -8\%$). Estas diferencias posiblemente son el efecto de la variabilidad natural entre árboles de una misma especie y de la forma y dimensiones de las probetas. En el mismo volumen, [19] se sugiere verificar la influencia de la anatomía de la madera y de la propagación del ultrasonido en el volumen de las probetas.

Módulo dinámico

La combinación de diferentes densidades y velocidades según la dirección de medición resulta en magnitudes particulares a cada tipo de material y en sus direcciones de anisotropía. Así, los módulos radiales para madera sólida y laminada son similares pero menores respecto a los módulos del multimaterial (Fig. 5). De manera diferente, para la dirección tangencial, el módulo de la madera laminada disminuye 34,3% respecto al de la madera sólida y el módulo del multimaterial se reduce en un 33,6% (Fig. 6). Para la dirección longitudinal el módulo de la madera laminada es 2,2% mayor en relación con la madera sólida. Igualmente, el módulo del multimaterial es 5,5% mayor que la de la madera sólida y 3,3% mayor respecto al de la madera laminada (Fig. 7).

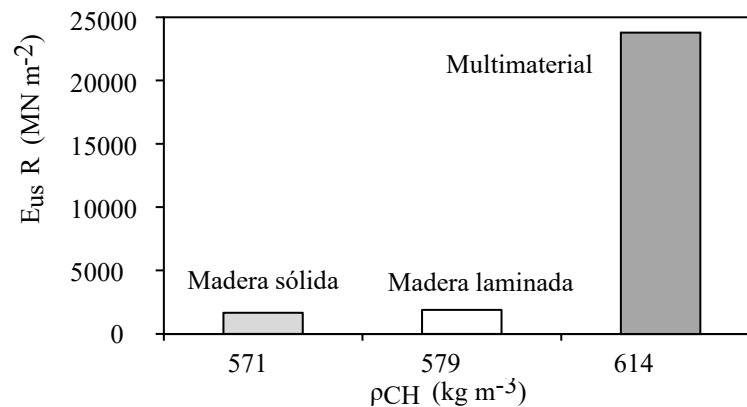


Figura 5. Densidades y módulos radiales.

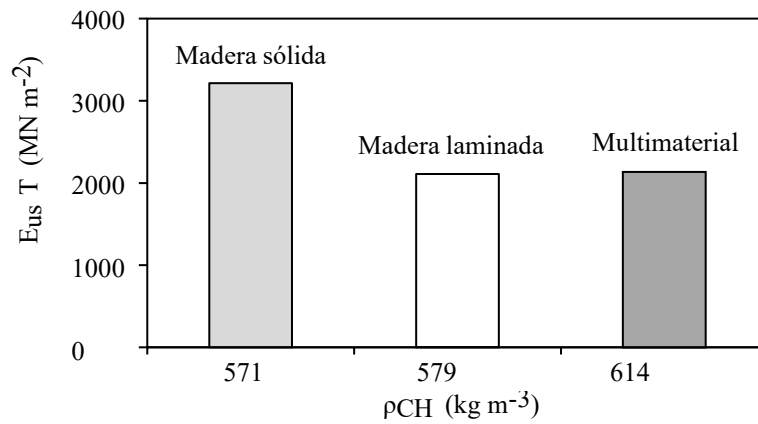


Figura 6. Densidades y módulos tangenciales.

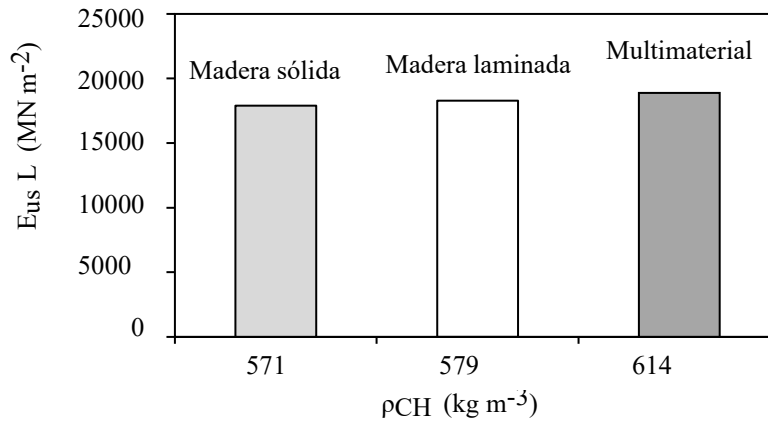


Figura 7. Densidades y módulos longitudinales.

Estos resultados representan los valores integrales de las probetas: en la madera sólida, los módulos dinámicos indican la respuesta medida en el volumen de las probetas, de su densidad promedio y el paquete de ondas de ultrasonido que transitan de manera continua y solo con interacción con los elementos celulares de la madera como son traqueidas, canales resiníferos y rayos (Figs. 8 y 9).

En cambio, las estructuras de las probetas laminadas contienen una capa de adhesivo embebida entre dos piezas de madera sólida y las probetas del multimaterial contienen una capa a la vez compuesta de adhesivo y malla metálica (Figs. 3 y 4).

Comparativamente con el análisis presentado en [14] cada una de las piezas de madera, de las capas de adhesivo y/o mallas presentes en los tres tipos de probetas, indican módulos distintos según la dirección de medición. Los módulos dinámicos en las direcciones radial y longitudinal de la madera laminada son similares a los de la madera sólida y verifican en este sentido la primera parte de la hipótesis. Los módulos dinámicos del multimaterial son mayores que los módulos correspondientes a la madera sólida y laminada en las direcciones radial y longitudinal pero no en la dirección tangencial.

De esta forma, se comprueba la hipótesis para dos direcciones y se rechaza para una de ellas. Este análisis verifica los resultados de las pruebas de grupos homogéneos: los módulos de elasticidad se agrupan para la madera sólida y laminada. Caso contrario son los módulos del multimaterial.

La calidad de la madera laminada depende principalmente de las características tecnológicas de cada lámina que la compone, del número y espesor de las láminas, de la eficiencia del pegamento utilizado y de la fuerza de compresión aplicada durante la fabricación [17][18]. Comparativamente con la madera aserrada, la madera laminada permite, entre otras ventajas, diseñar y poner en servicio elementos estructurales más grandes que lo que permite las dimensiones de la madera aserrada. Además, con la incorporación de componentes de madera laminada, el diseño arquitectónico se amplía. Los grandes claros se preconizan y las cualidades estéticas propias a la madera laminada le permiten figurar como elemento decorativo en el proyecto arquitectónico [19] [20].

Anisotropía

La relación de anisotropía de los módulos dinámicos entre las direcciones longitudinal y radial L/R de la madera laminada disminuye 19,3% en relación con la madera sólida (Tabla 3). La relación L/R del multimaterial disminuye 95,5% respecto a la madera sólida y 89,8% respecto a la laminada. En sentido contrario, la relación de anisotropía entre las direcciones longitudinal y tangencial L/T (Tabla 3) de la madera laminada aumenta 55,4% respecto a la de la madera sólida. La relación L/T del multimaterial aumenta 57,1% en proporción a la de la madera laminada. Estas proporciones se esquematizan en las Figs. 6, 7 y 8.

En la madera laminada el fenómeno es similar, pero el medio sufre una discontinuidad material en la capa de adhesivo conectado química y mecánicamente a la madera. La velocidad del ultrasonido en el poliuretano es de 1700 m s^{-1} [21], magnitud similar a la de la madera sólida en la dirección radial (1692 m s^{-1} , Tabla 2). Las mediciones de la velocidad sugieren que esta capa intermedia no modifica de manera significativa la velocidad del paquete de ondas a través del sistema madera-adhesivo.

Tabla 3. Relaciones de anisotropía y longitudes de onda.

Anisotropía			
	L/R		L/T
E_{us} madera sólida	10,7		5,6
E_{us} madera laminada	9,6		8,7
E_{us} multimaterial	0,8		8,8
	λ_R	λ_T	λ_L
	(m)	(m)	(m)
Madera sólida	0,031	0,044	0,103
Madera laminada	0,034	0,036	0,105
Multimaterial	0,115	0,035	0,102
E_{us} = Módulo dinámico; R = Radial, T = Tangencial; L = Longitudinal; λ = Longitud de onda.			

En la dirección radial, las ondas mecánicas del ultrasonido transitan a través de la madera utilizándola como medio de soporte. De esta manera viajan a través de la madera de diferentes formas: en la madera sólida las ondas se propagan principalmente a través de las secciones transversales de las paredes de las traqueidas (Fig. 8) con diámetro promedio de $3920 \mu\text{m}$ y grosor de la pared de $60 \mu\text{m}$.

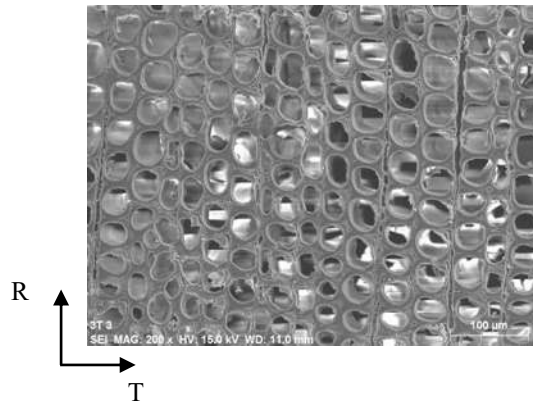


Figura 8. Plano radial-tangencial de *P. pseudostrobus*.

Para el multimaterial, la velocidad del ultrasonido en la malla de acero galvanizado es de 5900 m s^{-1} [22], magnitud mayor que la velocidad correspondiente a la dirección radial pero que se asemeja a la de la madera en su dirección longitudinal (5553 m s^{-1} , Tabla 2). De tal forma que, el sistema formado por la madera, la malla embebida entre el adhesivo y las superficies de las dos piezas de madera incrementa la velocidad del ultrasonido a una magnitud similar a la del multimaterial en su dirección longitudinal (5534 m s^{-1} , Tabla 2).

Las densidades entre las tres muestras no variaron significativamente. De tal forma, se puede inferir que la anisotropía de la velocidad de onda en la madera es el parámetro que caracteriza la magnitud del módulo dinámico en cada una de las direcciones de los especímenes. Sin embargo, es necesario considerar el efecto a nivel local del adhesivo y de la malla en la madera laminada y en el multimaterial [14].

Estas anisotropías en las velocidades, una vez ponderadas con la densidad (ec. 1), se manifiestan en los valores particulares de las relaciones de anisotropía de los módulos dinámico para cada tipo de material estudiado (Tabla 2 y Figs. 6, 7 y 8). La relación de anisotropía entre las dirección longitudinal y radial (L/R) de la madera laminada disminuye 11,5% respecto a la de la madera sólida. De manera más significativa, la relación de anisotropía L/R del multimaterial disminuye 92,5% respecto a la de la madera sólida y 91,2% respecto a la de la madera laminada.

En la dirección tangencial las ondas viajan a través de la pared y lúmenes celulares de manera análoga a la dirección radial (Fig. 9). Sin embargo, las irregularidades en longitud, diámetro y acomodo de las traqueidas, radios y canales resiníferos, así como la presencia de puntuaciones, disminuyen la velocidad de las ondas comparativamente con la dirección radial.

Como resultado, las relaciones de anisotropía de los módulos dinámicos en las direcciones longitudinal y tangencial (L/T) de la madera laminada es 55,4% mayor respecto a las de la madera sólida (Tabla 3). Para el multimaterial la relación de anisotropía L/T se incrementa 57,1% respecto a la de la madera sólida y 1,2% en comparación de la madera laminada.

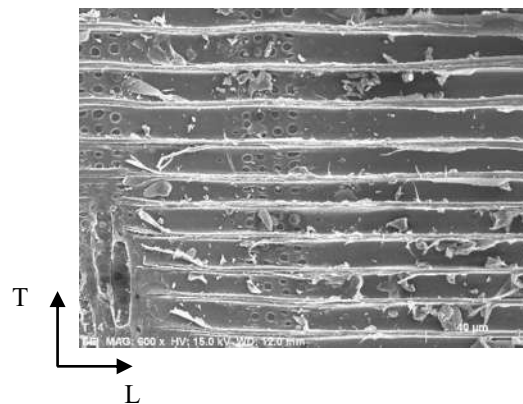


Figura 9. Plano tangencial-longitudinal de *P. pseudostrobus*.

Longitud de onda

La influencia de la variabilidad de la madera a nivel microanatómico (que comprende células, rayos y canales resiníferos), así como a nivel mesoanatómico (que se refiere a una capa de crecimiento, compuesta de una capa de madera temprana y otra de madera tardía), puede moderarse eligiendo la frecuencia del emisor para que las longitudes de onda en el material se encuentren en un rango entre la dimensión máxima de los elementos anatómicos y la dimensión mínima de la muestra [22].

En la presente investigación, el diámetro máximo de las traqueidas en el plano radial-tangencial (Fig. 8) es menor que las aristas de las probetas. En la dirección longitudinal el largo de las traqueidas es de 3920 μm (Fig. 8). Estos datos son menores que las dimensiones de las aristas de

las probetas en las direcciones tangencial y longitudinal en 0,15 m. Para la dirección radial, la arista es de 0,01 m.

Las longitudes de onda calculadas utilizando las velocidades registradas en cada tipo de material y dirección (Tabla 3) son mayores que la longitud de onda prevista por la ecuación (2). En este sentido, las longitudes de onda son mayores que los diámetros celulares y los espesores de las capas de crecimiento en las direcciones radial y tangencial (Fig. 10). Para la dirección longitudinal, las longitudes de onda son también mayores que el largo de las células. Así, se puede suponer que la onda no se dispersó ni atenuó de manera significativa [22] [23].

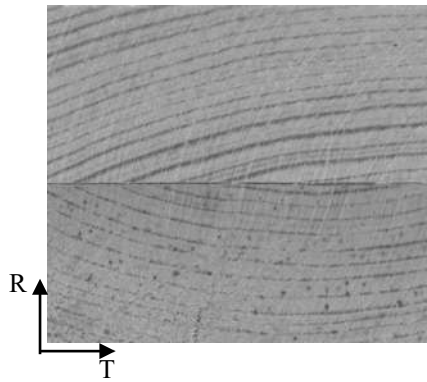


Figura 10. Plano radial-tangencial de una probeta de multimaterial

Las longitudes de onda promedio de esta investigación (Tabla 3) son del mismo orden que las reportadas por [24] para madera sólida de *P. pseudostrobus*: $\lambda_R = 0,044$ m, $\lambda_T = 0,031$ m y $\lambda_L = 0,116$ m. Igualmente, son parecidas a las publicadas en [23] para *Picea abies* ($\rho_{CH} = 476$ kg m⁻³), longitudes que se calcularon a partir de velocidades de ultrasonido utilizando sensores con frecuencia de 50 kHz, similares a los de esta investigación ($\lambda_R = 0,045$ m, $\lambda_T = 0,040$ m y $\lambda_L = 0,120$ m).

Para minimizar el efecto de la propagación del ultrasonido, la distancia de recorrido (d) debe ser mayor de la longitud de onda [25]. En esta investigación, la distancia entre sensores para la dirección radial es de 0,05 m, cantidad mayor que la longitud de onda para la madera sólida y laminada. Sin embargo, esta regla no se satisface para el multimaterial.

De tal forma, las mediciones en las direcciones radial y tangencial son suficientes para caracterizar el fenómeno del ultrasonido en las probetas de esta investigación. Sin embargo, las longitudes de onda en la dirección tangencial no satisfacen al límite este requerimiento para los tres tipos de material.

La distancia de recorrido de 0,01 m es, para fines prácticos, casi iguala la longitud de onda en los tres materiales y la extensión de las probetas es de 0,04 m. Estas consideraciones pueden incrementar la variabilidad y exactitud de las velocidades del ultrasonido y verse reflejadas en el cálculo de los módulos dinámicos.

4.2. Madera laminada y madera multimaterial-adhesivo-malla como reemplazo de madera maciza en restauración de edificios históricos

Resumen:

Los trabajos de restauración de estructuras de madera en edificaciones con valor histórico requieren la reparación y/o la sustitución de elementos estructurales. El objetivo de la investigación es comparar la densidad, la velocidad de onda, el módulo dinámico y el factor de calidad de probetas de madera sólida, de madera laminada y de un multimaterial de *P. pseudostrobus*. La hipótesis de trabajo propone que los módulos dinámicos de la madera laminada y del multimaterial de madera laminada reforzada con una malla de acero inoxidable son, al menos, iguales a los de la madera sólida. Se prepararon probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida, laminada y multimaterial, elaboradas con la especie *P. pseudostrobus*. Se determinaron el contenido de humedad y la densidad aparente de la madera. Se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal y se determinaron la velocidad de onda, el módulo dinámico y el factor de calidad. La evidencia empírica indica que la velocidad de onda, el módulo dinámico y el factor de calidad son diferentes para los tres tipos de probetas. Las características de la madera laminada y del multimaterial son similares a las de la madera sólida de *P. pseudostrobus*; de tal forma, los dos materiales compuestos tienen buenas perspectivas para sustituir piezas que funcionan como elementos de resistencia en estructuras de madera.

Palabras clave: Contenido de humedad, densidad, ultrasonido, módulo dinámico, factor de calidad, *P. pseudostrobus*

Abstract:

Wooden structure restoration work in historical buildings requires substitution and/or reparation of structural elements. The aim of this investigation is to compare the density, wave velocity, dynamic module, and quality factor in test pieces of solid wood, laminated wood and a multimaterial of *P. pseudostrobus*. The work hypothesis proposes that dynamic modules of laminated wood and multimaterial laminated wood reinforced with stainless steel mesh are, at least, equal to solid wood.

Small dimension test pieces made of solid wood, laminated wood, and multimaterial wood elaborated with the species *P. pseudostrobus* were prepared. Humidity content and apparent density of wood were determined. Ultrasound tests in radial, tangential, and longitudinal direction were done and wave velocity, dynamic module, and quality factor were determined. Empiric evidence indicates that wave velocity, dynamic module, and quality factors are different with the three kinds of test pieces. Laminated wood and multimaterial wood characteristics are similar to *P. pseudostrobus* solid wood; so that the two compound material have good expectations to substitute some pieces that work as resistance elements in wooden structures.

Key words: humidity contents, density, ultrasound, dynamic module, quality factor, *P. pseudostrobus*.

Problema

Los trabajos de restauración de estructuras de madera existentes en edificaciones con valor histórico y cultural requieren la reparación y/o, eventualmente, la sustitución de elementos estructurales tales como vigas, columnas y componentes de las armaduras para techos, muros, pisos y escaleras (Van Roy *et al.*, 2018). Con el objeto de respetar los principios para la preservación de estructuras históricas de madera del Consejo Internacional de Sitios y Monumentos (ICOMOS, 1999), es necesario sustituir piezas de madera deteriorada por elementos nuevos de la misma especie y con calidad tecnológica equivalente a la de la madera en servicio (Cruz *et al.*, 2015).

El responsable de los trabajos de restauración se enfrenta al problema de escasez de piezas de madera con dimensiones similares a las de los elementos estructurales en servicio. Una solución práctica a este problema es la elaboración de piezas de madera laminada, reforzada y/o reconstituida que satisfaga los criterios de resistencia mecánica, de tal forma que aseguren los criterios de confiabilidad estructural y de servicio de la estructura renovada (Croatto y Turrini, 2014; Larsen y Marstein, 2016).

Refuerzos para madera

Los elementos de madera, como las vigas usadas para soportar cargas de flexión, generalmente han sido sometidos a reemplazo o refuerzo con técnicas clásicas que involucran el uso de materiales de construcción comunes como el hormigón o el acero (Borri *et al.*, 2005). No obstante, la literatura reporta nuevas tecnologías y enfoques para reparar, restaurar y reforzar piezas de madera presentes en edificaciones donde la madera juega un papel prominente.

Las investigaciones recientes sobre el tema de refuerzo y reparación de elementos estructurales de madera preferentemente estudian vigas de madera sólida y laminada, unidades presentes en estructuras ya en servicio o potencialmente elementos estructurales para futuras edificaciones. Por ejemplo, Jasieńko y Nowak (2014) reforzaron vigas de madera nueva y antigua con el objetivo de evaluar diferentes configuraciones de adhesivos epoxi y placas de acero con pruebas de flexión; asimismo, Franke *et al.* (2015) reportan diferentes técnicas de refuerzo para vigas dependiendo del tipo u origen de la falla.

Una estrategia favorecida para reforzar piezas de madera es el uso de *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Schober *et al.* (2015) proponen CFRP para reparar y reforzar estructuras de madera. Para mejorar la resistencia mecánica de piezas de madera, Corradi *et al.* (2015) incorporan CFRP en piezas de madera sólida de *Castañee sativa*, mientras que Nadir *et al.* (2016) lo hicieron en madera laminada de *Hevea brasiliensis*. Reis *et al.* (2018) recomiendan la técnica de barras embebidas de CFRP para reforzar vigas de madera.

Particularmente, en trabajos de edificios históricos, Nowak *et al.* (2013) incorporan CFRP para reforzar vigas de *Pinus sylvestris* para restaurar la capacidad de carga de vigas de madera. Chang (2015) revisa diferentes técnicas de refuerzo y reparación para columnas y muros de madera, mientras que Gubana (2015) hizo lo mismo para pisos de madera. Rescalvo *et al.* (2017) y Rescalvo *et al.* (2018) emplean diferentes configuraciones de CFRP para reforzar madera antigua de *Pinus sylvestris* y analizar el incremento en la resistencia mecánica.

Desde otra perspectiva, Zhou *et al.* (2011) reportan resultados sobre la incorporación de malla de acero galvanizado para reforzar madera. Marzi (2015) revisa la prospectiva de materiales nano-estructurados para la protección y refuerzo de estructuras de madera. Byeon *et al.* (2016) investigan elementos estructurales híbridos de madera y otros materiales. Togay *et al.* (2017) proponen reforzar elementos estructurales con malla de aluminio. Rangavar (2017) reporta propiedades físicas y mecánicas de tableros de cemento-madera reforzados con malla de acero, mientras que Kohl *et al.* (2017) caracterizan en condiciones dinámicas multimateriales a base de madera y los proponen como sustitutos de piezas de madera sólida.

Para sintetizar las conclusiones de los autores citados, la tendencia contemporánea es reforzar piezas de madera mediante la incorporación de componentes de materiales sintéticos y metálicos para mejorar las propiedades tecnológicas de la madera. De esta manera, la sustitución de elementos estructurales en trabajos de restauración de edificios históricos y/o dañados se realizaría solo en eventos excepcionales como incendios y sismos.

Caracterización con ultrasonido

La tecnología del ultrasonido se aplica en el análisis ingenieril de estructuras históricas de madera para medir la velocidad de onda (Íñiguez-González *et al.*, 2015, Kloiber *et al.*, 2016, Branco *et al.*, 2017, Riggio *et al.*, 2018). Igualmente, el ultrasonido se utiliza en la caracterización mecánica de madera sólida (Tippner *et al.*, 2016) y laminada (Sanabria *et al.*, 2011).

Los parámetros necesarios para la caracterización dinámica de probetas de compuestos de madera son la densidad aparente (Niklas y Spatz, 2010) y la velocidad de onda en las tres direcciones de anisotropía de la madera (Dackermann *et al.*, 2016). Combinando la densidad y la velocidad de onda se determina el módulo dinámico (Gonçalves *et al.*, 2014). Otro parámetro en el diseño mecánico es el factor de calidad, el cual se emplea igualmente para clasificar y comparar las cualidades de la madera (Spycher *et al.*, 2008). En una madera, un significativo factor de calidad sugiere una mejor resistencia en relación con su densidad y una buena apreciación como material de ingeniería (Ashby, 2011).

Estas características están reportadas para la madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en trabajos del Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México (Sotomayor *et al.*, 2010, Sotomayor *et al.*, 2015). Sin embargo, no se encontró información sobre la caracterización de un multimaterial madera-adhesivo-malla caracterizado por ultrasonido.

Hipótesis

La hipótesis de trabajo propone que los módulos dinámicos de la madera laminada y del multimaterial son, al menos, iguales a los de la madera sólida de *P. pseudostrobus*. Esta hipótesis es verificable si se determinan las densidades, las velocidades de onda y se calculan los módulos dinámicos.

Objetivo

Esta investigación tiene por objetivo comparar la densidad, la velocidad de onda, el módulo dinámico y el factor de calidad de tres muestras de probetas de madera sólida, de madera laminada y de un multimaterial, todas elaboradas con la especie *P. pseudostrobus*. Como corolario, la madera laminada y el multimaterial se proponen como sustitutos de piezas de madera sólida en restauración de edificios históricos.

Metodología

Material

El material experimental consistió en tres grupos de 32 probetas recortadas de piezas de madera aserrada de *P. pseudostrobus* (Sáenz *et al.*, 2011) recolectadas en el estado de Michoacán, México. El primer grupo consistió en probetas elaboradas únicamente con madera sólida, etiquetadas como *solid-wood* (Figura 11). El segundo grupo se formó con dos láminas de madera unidas con un adhesivo de dos componentes de poliuretano (50%-50%), rotuladas como madera laminada (Figura 12). El tercer grupo, denominado multimaterial (Figura 13), se elaboró con dos láminas de madera

sólida y entre ellas una malla de acero galvanizado (AISI 304 Stainless Steel Mesh). Las piezas de madera y la malla se unieron con un adhesivo de dos componentes de poliuretano. Las probetas laminadas y el multimaterial se fabricaron con una presión de 200 kg cm^{-2} y una temperatura de 80°C , durante 30 minutos. Las dimensiones de las probetas fueron $0,4 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$ en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L).



Figura 11. Madera sólida

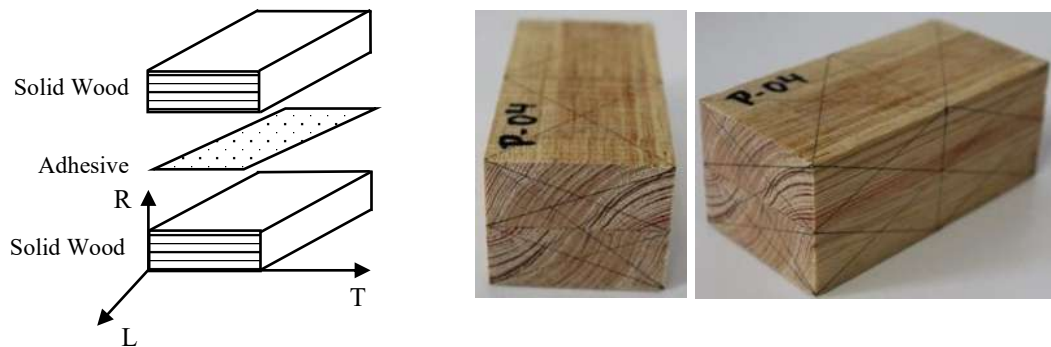


Figura 12. Madera laminada

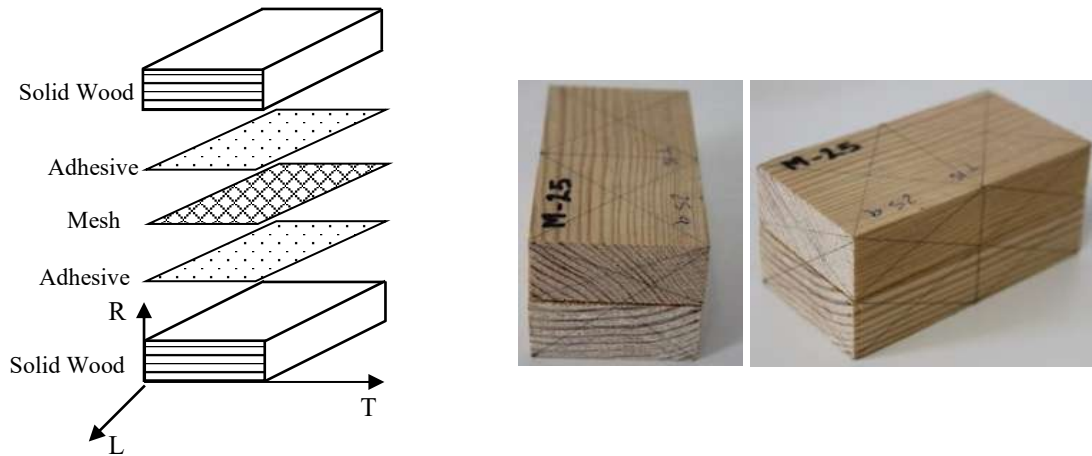


Figura 13. Multimaterial

Programa de Pruebas

La madera y las probetas se estabilizaron antes y después de su fabricación durante 3 meses en una cámara de acondicionamiento con temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C})$ y humedad relativa del aire de $65\% (\pm 2\%)$, hasta que su peso fue constante. La densidad aparente de la probeta (ρ_H) se determinó con la relación peso/volumen al momento del ensayo, correspondiente a un contenido de humedad en equilibrio (International Organization for Standardization ISO 13061-1:2014). Con el objetivo de simplificar el texto, en adelante el término “densidad aparente” se escribe como “densidad”.

El contenido de humedad (H) de la madera se determinó con la relación entre el peso al momento de las pruebas y el peso en estado anhidro (International Organization for Standardization ISO 13061-2:2014).

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir el tiempo de transmisión de onda con el aparato *Sylvatest*® (frecuencia 22 kHz) y dividirlo por la distancia entre los captores emisor y receptor de la señal del ultrasonido, posicionados en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L), normales a los planos de contacto correspondientes (RT, RL y TL).

La velocidad del ultrasonido (v_{us}) se calculó con la relación tiempo de transmisión/distancia de recorrido. Se realizaron tres mediciones en cada plano en las posiciones 11, 12 y 13 indicadas en las Figuras 14 y 15, de tal forma que las probetas se rotaron 90 grados para obtener direcciones normales a los planos de contacto.

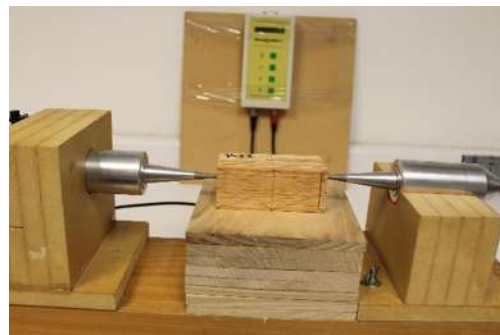
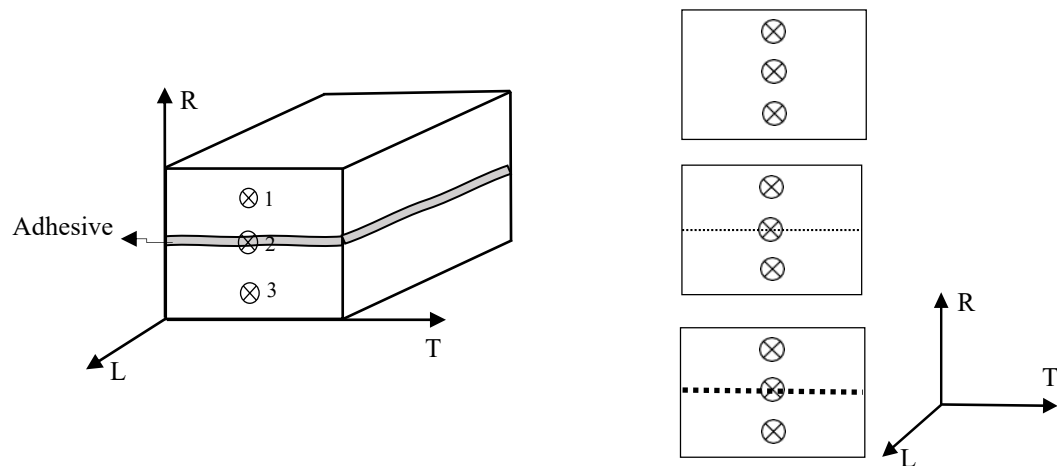


Figura 14. Prueba de ultrasonido en la dirección longitudinal

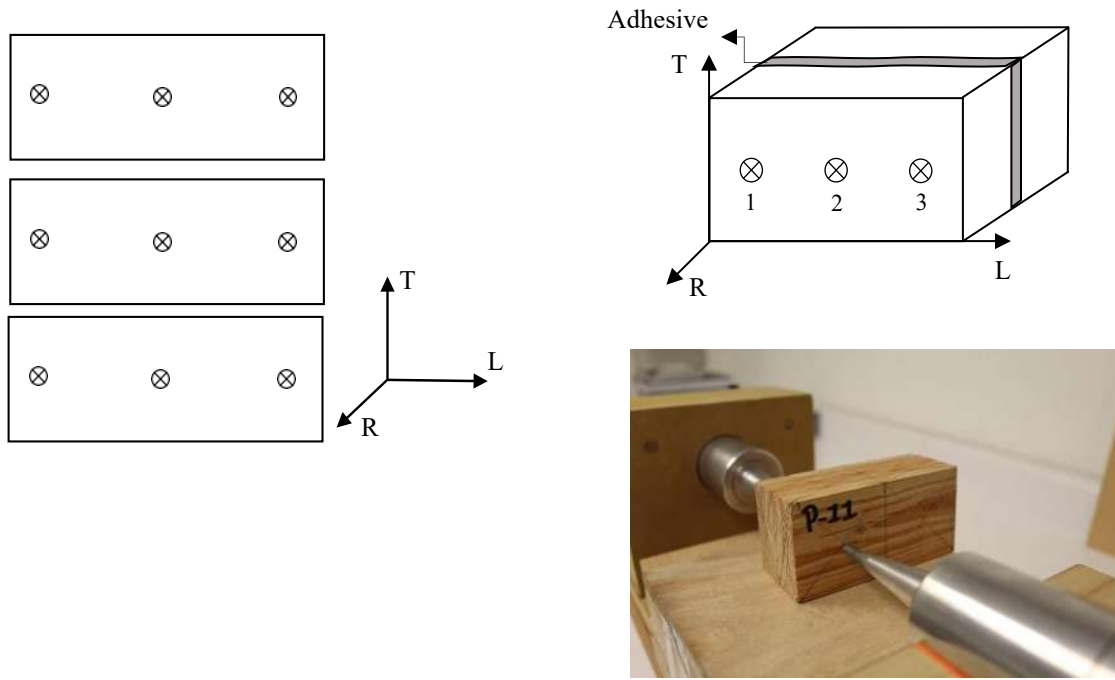


Figura 15. Prueba de ultrasonido en la dirección tangencial

El módulo dinámico se calculó con la ecuación (3) (Dackermann *et al.*, 2016):

$$E_{us} = \rho_H \times v_{us}^2 \quad (3)$$

Donde: E_{us} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_H = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad de onda ($m\ s^{-1}$)

El factor de calidad se calculó con la ecuación (4) (Spycher *et al.*, 2008):

$$F_{us} = v_{us} / \rho_H \quad (4)$$

Donde: F_{us} = Factor de calidad ($N\ m^{-2}$)

ρ_H = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad de onda ($m\ s^{-1}$)

Estrategia de investigación

La estrategia experimental consistió en determinar los valores medios ($\bar{x}$), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación ($CV = \sigma/\bar{x}$) de las tres muestras de probetas de madera sólida, madera laminada y multimaterial.

Para fines de análisis, se especifican dos parámetros físicos: contenido de humedad (H) y densidad (ρ_H); y tres parámetros mecánicos: velocidad de onda (v_{us}), módulo dinámico (E_{us}) y factor de calidad (F_{us}). El subíndice H significa que la densidad corresponde al contenido de humedad del espécimen. El subíndice (us) señala que los parámetros son derivados de pruebas de ultrasonido. En el mismo contexto, se definen tres muestras: madera sólida, madera laminada y multimaterial; tres planos de contacto: TL, RL y RT; y tres direcciones de la velocidad de onda: R, T y L.

Análisis y resultados

La Tabla 4 presenta la densidad (ρ_H), el contenido de humedad (H), la velocidad de onda (v_{us}), el módulo dinámico (E_{us}) y el factor de calidad (F_{us}) para la madera sólida, la madera laminada y el multimaterial.

Tabla 4. Densidad, contenido de humedad, velocidad de onda, módulo dinámico y factor de calidad.

Plano-Dirección	TL-R	RL-T	RT-L
Madera Sólida			
ρ_H (kg m ⁻³)	589	589	589
H (%)	11.6	11.6	11.6
v_{us} (m s ⁻¹)	765	685	5040
E_{us} (MN m ⁻²)	346	291	15062
F_{us} (m ⁴ kg ⁻¹ s ⁻¹)	1.30	1.16	8.55
Madera Laminada			
ρ_H (kg m ⁻³)	583	583	583

H (%)	10.7	10.7	10.7
v_{us} (m s⁻¹)	688	692	4110
E_{us} (MN m⁻²)	277	366	9873
F_{us} (m⁴ kg⁻¹ s⁻¹)	1.18	1.19	7.05
Multimaterial			
ρ_H (kg m⁻³)	586	586	586
H (%)	10.4	10.4	10.4
v_{us} (m s⁻¹)	1291	493	4136
E_{us} (MN m⁻²)	976	143	10098
F_{us} (m⁴ kg⁻¹ s⁻¹)	2.20	0.84	7.06
ρ _H = Densidad; CH = Contenido de Humedad; v _{us} = Velocidad del ultrasonido; E _{us} = Módulo dinámico; F _{us} = Factor de calidad.			

Contenido de humedad

El contenido de humedad de las tres muestras varía en el intervalo de 10.4 a 11.6 (Tabla 4). Los coeficientes de variación del contenido de humedad al interior de cada muestra varían de 5.1 a 9.8%. En consecuencia, se considera a la madera de *P. pseudostrobus* estabilizada en estado seco y se propone que la variación del contenido de humedad de las probetas no interviene de manera significativa en los resultados.

Densidad

Para la madera sólida y laminada las magnitudes de la densidad son similares a las reportadas por Sotomayor *et al.* (2010) para madera de *P. pseudostrobus* y para madera laminada de esta misma especie en Sotomayor *et al.* (2015). Sin embargo, no se encontró información para comparar la densidad del multimaterial. En comparación con la densidad de la madera sólida, la densidad de la madera laminada disminuye 1% y la densidad del multimaterial disminuye 0.5% (Tabla 4). Estos resultados sugieren que los tratamientos de laminado y de fabricación del multimaterial no modifican de manera significativa la densidad de los especímenes fabricados únicamente con madera sólida.

Uno de los criterios para sustituir una pieza de madera durante los trabajos de restauración de edificios históricos es emplear la misma especie, densidad y resistencia mecánica (Cruz *et al.*, 2015). Desde esta perspectiva, piezas de madera laminada y del multimaterial pueden ser colocadas en sustitución de la madera sólida de *P. pseudostrobus*. Para que esta propuesta pueda extenderse a otras especies, es prudente realizar estudios específicos sobre la variación de la densidad al fabricar madera reconstituida empleando especies diferentes a la estudiada en esta investigación.

Velocidad del ultrasonido y módulo dinámico

Las Figuras 16, 17 y 18 detallan los tres módulos dinámicos (E1, E2 y E3) determinados localmente en las tres posiciones de los especímenes de las tres muestras, de acuerdo a la estrategia de muestreo detallada en las Figuras 11 a 15.

Para la madera sólida de *P. pseudostrobus*, las magnitudes de la velocidad de onda y del módulo dinámico son similares a las reportadas por Sotomayor *et al.* (2010) y Sotomayor *et al.* (2015). Sin embargo, los valores promedio de v_u y E_{us} para las direcciones radial y tangencial de esta investigación (2019) son menores que los de la bibliografía. Este resultado es consistente con el análisis posterior de las mediciones locales.

Los tres módulos dinámicos determinados en la dirección radial en un espécimen son similares entre ellos (Figura 16). No obstante, hay variación entre las tres muestras. Los módulos dinámicos promedio del multimaterial (976 MN m^{-2}) son hasta 2.8 veces mayores que los de la madera sólida (346 MN m^{-2}) y aún más, 3.5 veces mayor que los de la madera laminada (277 MN m^{-2}). Este resultado indica que, con respecto a la madera sólida y laminada de *P. pseudostrobus*, el multimaterial incrementa el módulo dinámico en la dirección radial.

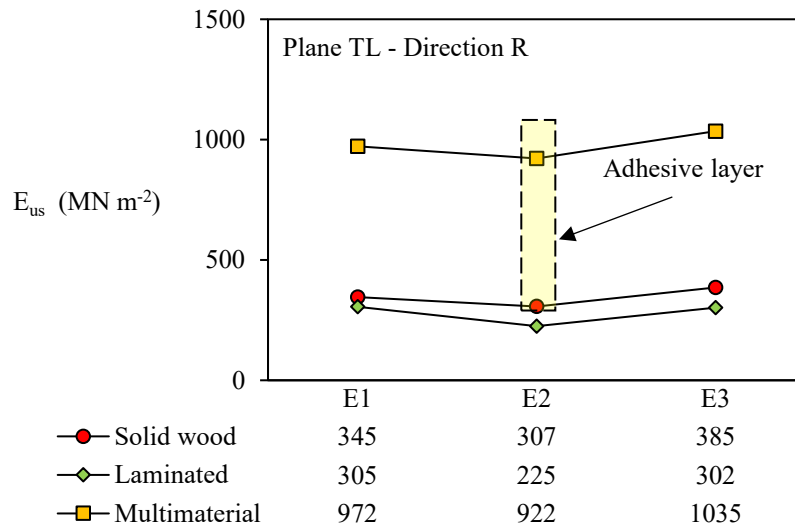


Figura 16. Módulos dinámicos en la dirección radial

Para las muestras de la madera sólida y multimaterial, los tres módulos dinámicos medidos en la dirección tangencial de los especímenes son similares (Figura 17). Sin embargo, el módulo E2 para la madera laminada, correspondiente a la capa donde está el adhesivo (plano RT paralelo a la dirección tangencial) es mayor 7.15 veces con relación al de la madera sólida, y 5.6 veces mayor con respecto al de la madera laminada.

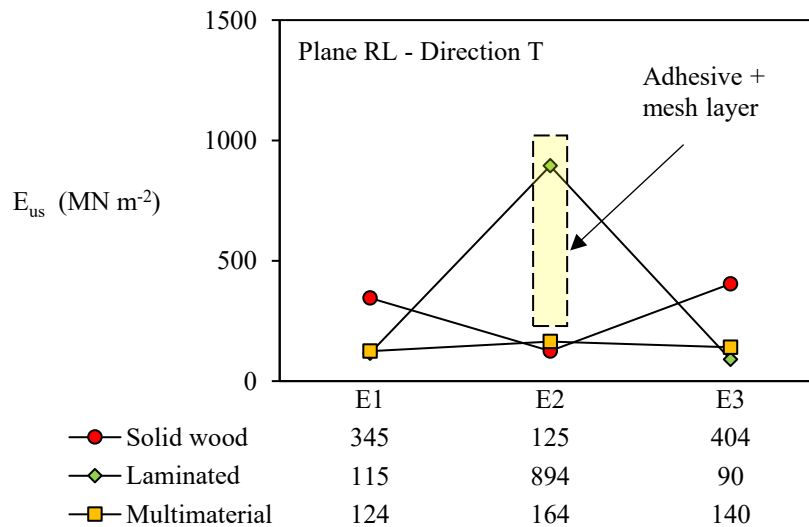


Figura 17. Módulos dinámicos en la dirección tangencial

Así, los especímenes de madera laminada incrementan su módulo dinámico a nivel local por la presencia de una capa de pegamento. Este fenómeno se refleja en el aumento del módulo dinámico promedio de los especímenes de madera laminada en 20.5% respecto a los de madera sólida y en 60.1% respecto a los del multimaterial. En el mismo contexto, no se identifica un efecto significativo del plano adhesivo-malla en las mediciones de E1, E2 y E3 de los especímenes del multimaterial. Para la dirección longitudinal, normal al plano radial-tangencial, los módulos dinámicos de los especímenes de madera laminada, se confunden con los módulos dinámicos de los especímenes del multimaterial (Figura 18). Sin embargo, los módulos dinámicos de los especímenes de madera sólida son mayores respecto a los de madera laminada y multimaterial.

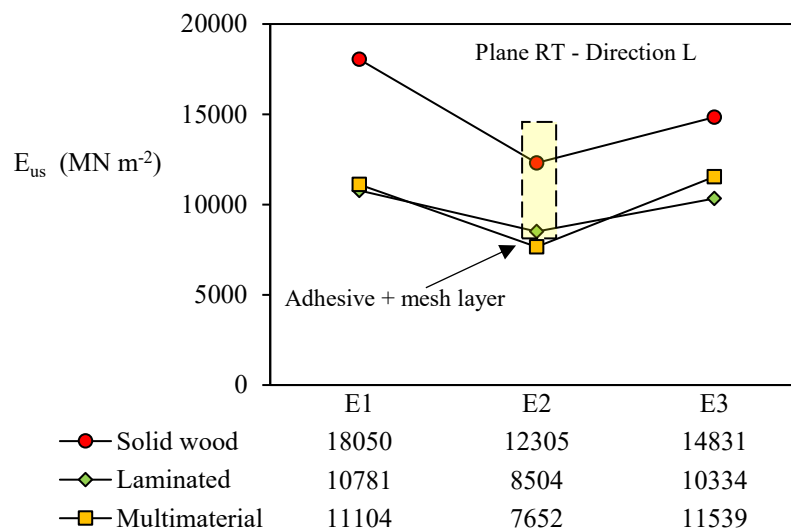


Figura 18. Módulos dinámicos en la dirección longitudinal

Calculando los valores promedio, los módulos dinámicos de la madera sólida son 35.4% mayores que los de la madera laminada y 33% respecto a los del multimaterial. De particular atención son los valores menores de E2 correspondientes a las mediciones a través de los planos RT de adhesivo en los especímenes de madera laminada y multimaterial en comparación con los módulos dinámicos de los especímenes de la madera sólida.

El módulo dinámico es calculado a partir de la densidad y de la velocidad de onda con la ecuación (4). Así, cuando se incrementa la densidad, se produce un aumento lineal del módulo dinámico. Por su parte, un incremento en la velocidad de onda provoca un incremento de segundo orden en el módulo dinámico.

Factor de calidad

Para las tres muestras estudiadas, los factores de calidad promedio, los cuales fueron calculados con los valores promedio de las velocidades de onda y de las densidades, son mayores para la dirección longitudinal en comparación con los factores de calidad correspondientes a las direcciones radial y tangencial (Figura 19).

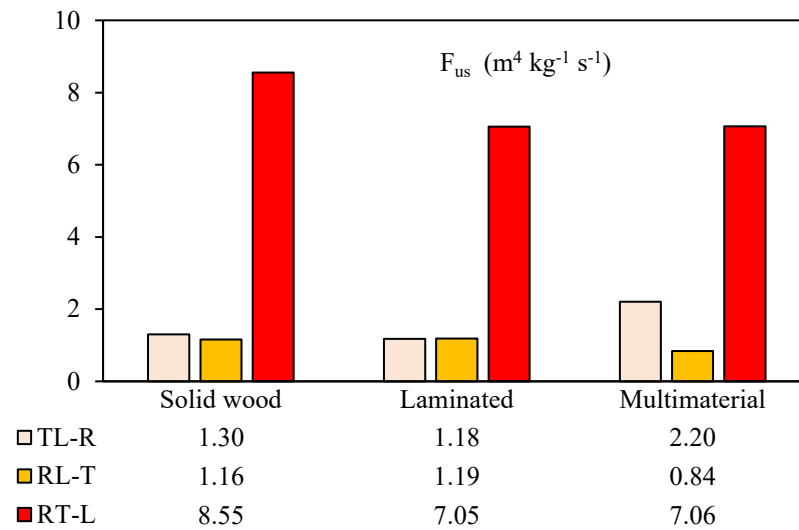


Figura 19. Factor de calidad

Estas magnitudes representan las velocidades de onda medidas en las direcciones R, T y L, correspondientes a los planos TL, RL y RT, y divididas por las densidades promedio de los 32 especímenes de las tres muestras estudiadas. Particularmente, las medidas en los puntos correspondientes a las velocidades coincidentes con los planos de adhesivo (planos TL y RT de la madera laminada) y de adhesivo y malla (planos TL y RT del multimaterial) varían comparativamente. Sin embargo, para fines de la caracterización, estos datos se integran en los valores de los factores de calidad. Las magnitudes de los factores de calidad determinados en esta investigación (2019) fueron menores que las reportadas por Sotomayor *et al.* (2010) para madera sólida de *P. pseudostrobus*: $F_{us\ R} = 6.97$, $F_{us\ T} = 1.96$, y $F_{us\ L} = 13.35$, con $\rho_H = 436\text{ kg m}^{-3}$ y $H = 10.63\%$.

4.3. Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*

Resumen

La madera laminada, potencialmente puede sustituir a la madera sólida para elaborar un material de ingeniería menos variable y más homogéneo. Existe poca información que compare simultáneamente, y en una misma especie, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en madera sólida *versus* laminada. El objetivo de la investigación fue verificar experimentalmente, en probetas de pequeñas dimensiones, si las características de la madera laminada de *Pinus pseudostrobus* son similares a las de la madera sólida. Para ello, se calcularon sus densidades y se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. También, se determinaron las velocidades y los módulos dinámicos. Los resultados indican que la densidad de la madera laminada aumenta en comparación con la de la madera sólida.

Las velocidades y los módulos dinámicos disminuyen en las direcciones radial y tangencial; en cambio, aumentan para la dirección longitudinal. Se verificó experimentalmente que las magnitudes de la densidad, la velocidad y el módulo dinámico en madera laminada son similares a las de madera sólida de esta especie. La variabilidad en las características estudiadas disminuye como efecto de reconstituir madera sólida. Para las velocidades y los módulos dinámicos de la madera sólida, sus relaciones de anisotropía muestran proporciones similares a las reportadas en la literatura, pero las magnitudes son particulares a cada especie. La investigación aporta datos de referencia e informa que la madera, sólida y laminada, de *P. pseudostrobus* puede ser caracterizada con un método no destructivo.

Palabras clave: anisotropía de la madera; caracterización mecánica; contenido de humedad; pruebas no destructivas; variabilidad de la madera.

Abstract

Laminated wood can potentially replace solid wood to make a less variable and more homogeneous engineered material. There is little information that compares, simultaneously and in the same species, the ultrasound speeds, and the dynamic modules in solid versus laminated wood. The objective of the investigation was to verify experimentally, in small specimens, if the characteristics of *Pinus pseudostrobus* laminated wood are like those of solid wood. For this, their densities were calculated, and ultrasound tests were performed in the radial, tangential and longitudinal directions. Also, the speeds and dynamic modules were determined. The results indicate that the density of laminated wood increases, compared to that of solid wood. Speeds and dynamic moduli decrease in radial and tangential directions; instead, they increase for the longitudinal direction. It was experimentally verified that the magnitudes of density, velocity and dynamic modulus in laminated wood are like those of solid wood of this species. The variability in the studied characteristics decreases as an effect of reconstituting solid wood. For the speeds and dynamic modules of solid wood, their anisotropy ratios show proportions similar to those reported in the literature, but the magnitudes are specific to each species. The research provides reference data and shows that the solid and laminated wood of *P. pseudostrobus* can be characterized with a non-destructive method.

Keywords: anisotropy of wood, mechanical characterization, moisture content, non-destructive testing, wood variability

Introducción

Los diámetros de los árboles de especies maderables son cada vez más pequeños, así que las piezas de madera sólida con dimensiones de empleo para aplicaciones industriales son más escasas. Una posible solución tecnológica ante esta problemática es la elaboración de piezas de madera laminada con dimensiones y características similares a las de madera sólida, que puedan sustituirla como material de ingeniería (Kandler *et al.*, 2018).

Otro problema técnico con respecto a la madera sólida, es la variabilidad en las magnitudes de sus módulos dinámicos entre especies, al interior de una misma especie y aun entre piezas de madera aserradas de un mismo árbol (Brémaud, 2012; Baar *et al.*, 2012). De igual forma, los módulos dinámicos varían según las direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso (Dackermann *et al.*, 2016; Bachtiar *et al.*, 2017). Por lo que, para contribuir a solucionar esta problemática, la tendencia en ciencias y tecnología de la madera es la caracterización mecánica de la madera laminada y su comparación con las propiedades de la madera sólida.

Las características mecánicas de la madera laminada dependen, entre otros factores, de las propiedades de la madera de la especie, del tipo de adhesivo, así como del tiempo y la presión aplicados a los laminados durante su fabricación (Bourreau *et al.*, 2013; Kwon *et al.*, 2014; Dietsch y Tannert, 2015; Liew y Singan, 2016). Existe evidencia empírica de que los módulos dinámicos de la madera laminada son similares a los de la madera sólida (Ribeiro *et al.*, 2009; Gaff y Gáborik, 2014); este argumento coincide con los resultados derivados de pruebas de flexión estática (Ribeiro *et al.*, 2009; Nadir y Nagarajan, 2014), pero no se puede generalizar a todas las especies.

La literatura acerca de la caracterización mecánica de madera sólida y laminada de especies mexicanas incluye información sobre datos obtenidos con pruebas en flexión estática (Araujo *et al.*, 2005; Sotomayor *et al.* 2020) y con métodos no destructivos (Sotomayor, 2020). Entre estos últimos, el método de ultrasonido que permite medir la velocidad de onda a través de la madera y, ponderándola con su densidad, permite calcular el módulo dinámico (Ho, 2017; Ettelaei *et al.*, 2019; Sotomayor, 2019). Empero, existe poca información de pruebas no destructivas que comparen en una misma especie las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos, simultáneamente en madera sólida *versus* laminada, distinguiendo al mismo tiempo las direcciones de anisotropía de la madera.

Objetivos

El objetivo de la investigación fue verificar experimentalmente si las características mencionadas de madera laminada de esta especie son similares a las de madera sólida. La hipótesis de la investigación fue que el laminado de la madera sólida de *P. pseudostrobus* incrementa la magnitud de su densidad, velocidad de ultrasonido, módulo dinámico y, al mismo tiempo, disminuye la variabilidad de estos parámetros. Esta propuesta está limitada a mediciones derivadas de pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

Materiales y métodos

Materiales

Se recolectaron piezas de madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *pseudostrobus*, en empresas de transformación de productos forestales de la región de Hidalgo y Uruapan, Michoacán, México. El taxón botánico de la madera se identificó en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. A partir del material colectado se prepararon 35 probetas de madera sólida y 35 de madera laminada siguiendo el procedimiento reportado por Sotomayor *et al.* (2015).

La configuración de las probetas se muestra en la Fig. 20. Para adherir las cinco láminas, se aplicaron $2,5 \text{ kg m}^{-2}$ de pegamento de contacto a base de resina de poliacetato de vinilo, repartidos en las cuatro caras interiores de las probetas, correspondientes al plano longitudinal-tangencial. El tiempo de prensado fue de 48 horas en ambiente de laboratorio (temperatura de 20°C y humedad relativa del aire de 65%). Las dimensiones de las probetas fueron $0,05 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las probetas se acondicionaron durante seis meses en una cámara con temperatura de 23°C y humedad relativa del aire de 60% hasta que su peso fue constante.

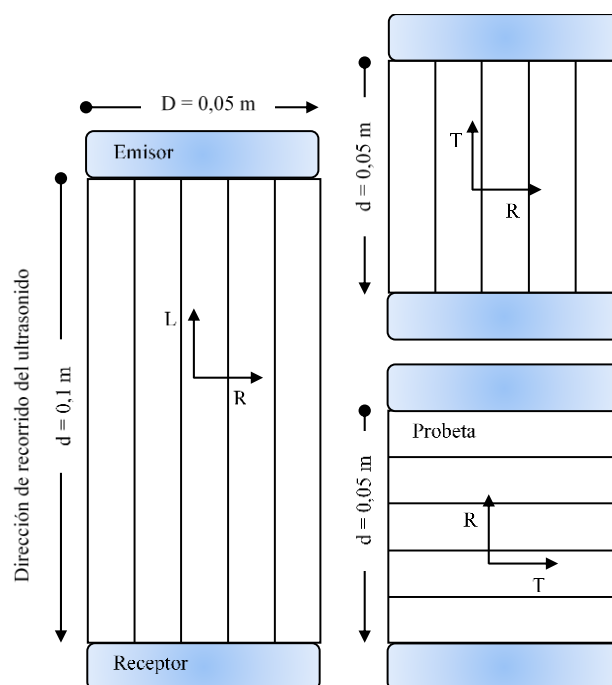


Figura 20. Configuración de las pruebas de ultrasonido. R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; d = Distancia de recorrido.

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en dos grupos homogéneos de 35 probetas (réplicas) de madera (*P. pseudostrobus*) seleccionadas al azar: el primer grupo fue madera sólida y el segundo de madera laminada. El proceso de laminado se consideró el tratamiento. El contenido de humedad (CH) se consideró el factor fijo y controlable. Las variables de entrada fueron los parámetros medidos en la madera sólida y las variables de salida fueron los medidos en la madera laminada. Se realizaron siete experimentos de un solo factor de variación (tratamiento de laminado). El primero fue el análisis de las densidades (ρ_{CH}) de la madera sólida *versus* laminada. Los otros seis experimentos fueron los análisis de las velocidades (v_{us}) y los módulos dinámicos (E_{us}) en tres niveles: direcciones radiales (R), tangenciales (T) y longitudinales (L).

Tanto para la madera sólida como la laminada, se calcularon las medias (μ), las desviaciones estándar (σ) y los coeficientes de variación ($CV = \sigma/\mu$). Asimismo, se realizaron pruebas de normalidad (SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado). Cuando estas pruebas

indicaron distribuciones anormales, se practicaron análisis de medianas de Kruskal-Wallis (K-W). Cuando las distribuciones resultaron normales, se verificaron las igualdades de varianzas (Ver-var) y se practicaron análisis de varianzas (Anova).

Para todas las pruebas el nivel de significancia fue de 95% ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, el criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. Se verificó la hipótesis nula que propone que el laminado no influye en el parámetro calculado mediante $H_0: \mu_1 = \mu_2$ donde H_0 = Hipótesis nula; μ_1 = Media de la madera sólida (densidad, velocidad, módulo dinámico); μ_2 = Media de la madera laminada (densidad, velocidad, módulo dinámico). Para realizar los cálculos estadísticos se utilizó el paquete estadístico *Statgraphics®*.

Pruebas de laboratorio

La densidad de la madera se determinó por la razón entre el peso y el volumen de la probeta al momento del ensayo de acuerdo a la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b). El contenido de humedad de la madera se calculó por el método de diferencia de pesos húmedo y seco, según la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a), en 20 probetas adicionales: 10 de madera sólida y 10 de laminada. Sus dimensiones fueron 0,05 m $\times$ 0,05 m $\times$ 0,02 m (en R, T, L).

El contenido de humedad de la madera sólida fue 11,7% (CV = 2%) y el de la madera laminada 10,4% (CV = 3%). Todas las probetas se elaboraron con madera sana y se revisó que estuviesen libres de anomalías de crecimiento como nudos, rajaduras y desviación de la fibra.

Las pruebas de ultrasonido consistieron en medir el tiempo de transmisión del impulso en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con el aparato V-Meter MK IV (Frecuencia = 54 kHz) marca *James Instruments*® (Fig. 21).



Figura 21. Pruebas de ultrasonido.

Las velocidades del ultrasonido (v_{us}) se calcularon con las distancias de recorrido (d) divididas entre los intervalos de los tiempos de transmisión (Fig. 20). Los módulos dinámicos (E_{us}) se calcularon con la fórmula (5) (Ettelaei *et al.*, 2019):

$$E_{us} = \rho_{CH} v_{us}^2 \quad (5)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_{CH} = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$)

Resultados y discusión

Densidades

Los resultados de las pruebas de ultrasonido, resumidos en la tabla 5, muestran que la densidad de la madera laminada aumenta 7% en comparación con la de la madera sólida. Este resultado indica, experimentalmente, que el proceso de laminado incrementa las magnitudes de las densidades. No obstante, el análisis de varianza de la madera sólida *versus* laminada no reveló diferencias estadísticamente significativas (Tabla 6). Como efecto del tratamiento de laminado, la variabilidad de la densidad de la madera laminada disminuye 67% respecto a la madera sólida. Así, este resultado sugiere que el laminado de la madera de *P. pseudostrobus* disminuye la variabilidad de las densidades. Estos corolarios son similares a los reportados por Sotomayor (2018) quien reporta incrementos en la densidad de la madera laminada respecto a la madera sólida de 10% para *Enterolobium cyclocarpum*, de 1% para *Tabebuia rosea* y para *Juglans pyriformis* de 6%. En el mismo contexto, informa una disminución en la variabilidad de 25%, 35% y 16% respectivamente.

Tabla 5. Resultados pruebas de ultrasonido.

Madera sólida							
	ρ_{CH}	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$
	($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)
μ	479	2300	1652	4270	2569	1331	8947
σ	34	233	212	511	536	412	2435
CV	7	10	13	12	21	31	27
Madera laminada							
	ρ_{CH}	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$
	($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)
μ	514	2199	1295	5919	2493	870	17996
σ	12	132	134	112	308	169	764
CV	2	6	10	2	12	19	4
Diferencias entre medias laminada/sólida (%)							
-	ρ_{CH}	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$

-	+7	-4	-22	+39	-3	-35	+101
Diferencias entre coeficientes de variación laminada/sólida (%)							
-	ρ_{CH}	v_{us} R	v_{us} T	v_{us} L	E_{us} R	E_{us} T	E_{us} L
-	-67	-41	-19	-84	-41	-37	-84
ρ_{CH} = Densidad; v = Velocidad del ultrasonido; E = Módulo dinámico; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.							

Tabla 6. Resultados pruebas estadísticas.

	SE	AE	Ver-Var	Anova	K-W
	-	-	P ($\alpha = 0,05$)	P ($\alpha = 0,05$)	P ($\alpha = 0,05$)
ρ_{CH} Madera sólida	-1,786	0,094	<0,001	<0,001*	-
ρ_{CH} Madera laminada	0,005	-0,721	-	-	-
v_{us} R Madera sólida	-4,146	4,194	-	-	< 0,001*
v_{us} R Madera laminada	-2,042	0,925	--	-	
v_{us} T Madera sólida	5,359	5,700	-	-	< 0,001*
v_{us} T Madera laminada	-2,659	1,942	-	-	-
v_{us} L Madera sólida	-1,078	-0,968	< 0,001*	< 0,001*	-
v_{us} L Madera laminada	0,176	-1,036	-	-	-
E_{us} R Madera sólida	-3,158	1,502	-	-	0.073**
E_{us} R Madera laminada	-1,237	0,305	-	-	-
E_{us} T Madera sólida	5,954	8,523	-	-	< 0,001*
E_{us} T Madera laminada	-1,801	0,961	-	-	-
E_{us} L Madera sólida	-0,762	-1,059	< 0,001*	< 0,001*	-
E_{us} L Madera laminada	0,246	-0,335	-	-	-
ρ_{CH} = Densidad; v = Velocidad del ultrasonido; E = Módulo dinámico; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; K-W = Kruskal-Wallis; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; * = Diferencia significativa para 95% de confiabilidad; ** = No existe diferencia significativa para 95% de confiabilidad.					

Este aumento aparente en la densidad de la madera laminada puede ser explicado tanto por la variabilidad natural al interior de la misma especie, como por la contribución del peso del adhesivo incorporado en la madera laminada. Por su parte, la disminución en la variabilidad de la densidad después del proceso de laminado parece ser ocasionada por el reacomodo y la combinación de las piezas que conforman la madera laminada (Bourreau *et al.*, 2013).

Velocidades

Se encontró que las velocidades de transmisión del ultrasonido disminuyen en las direcciones radial (4%) y tangencial (22%). En cambio, aumentan para la dirección longitudinal (39%). De aquí que la hipótesis referente al incremento en las velocidades como resultado del laminado se válida para la dirección longitudinal, pero discrepa para las direcciones radial y tangencial. Esta diferencia puede ser ocasionada por la presencia en la madera laminada de cuatro capas de adhesivo que funcionan como revestimientos aislantes y puede alterar la transmisión del ultrasonido (Dietsch y Tannert, 2015). Los coeficientes de variación de las velocidades disminuyen en la madera laminada en las tres direcciones de anisotropía un promedio de 48% (Tabla 5). Este resultado verifica la hipótesis sobre la disminución de la variabilidad de las velocidades de la madera de *P. pseudostrobus* por el efecto del laminado.

Las pruebas estadísticas indican que las transmisiones del ultrasonido no corresponden a distribuciones normales para las direcciones radial y tangencial (Tabla 6). Así que, para ambas direcciones, las pruebas de diferencias de medianas resultan en diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las velocidades de la madera sólida y las de la madera laminada.

En la dirección radial de la madera sólida, el ultrasonido se transmite a través de las diferentes capas de crecimiento de la madera. De manera análoga, en la madera laminada viaja a través de las diferentes láminas que forman la sección transversal de las probetas. En cambio, en la dirección tangencial, el ultrasonido viaja de forma paralela a las capas de crecimiento de la madera sólida y, en el caso de la madera laminada, viaja en la dirección tangencial de las láminas y los planos de pegamento entre ellas. Debido a esta estructura natural en la madera sólida, y/o artificial en la laminada, cualquier pequeña anomalía en los tejidos leñosos o en el acomodo de las láminas puede

alterar el tiempo de recorrido del ultrasonido. Aunado a esto, hay que considerar la variabilidad y heterogeneidad en la estructura anatómica de la madera en probetas con dimensiones de cinco centímetros en las aristas de su sección transversal, valores mínimos para piezas de madera para uso estructural.

Para la dirección longitudinal, el análisis de varianza también indica diferencias significativas entre las velocidades de la madera sólida y las de laminada. El ultrasonido viaja en paralelo a la estructura tubular de las células alineadas en la dirección longitudinal de la madera sólida. En el mismo sentido, el arreglo artificial de la madera laminada hace más homogénea la estructura material en esta dirección. Para ilustrar este efecto, en la figura 22 se observa que la dispersión de las densidades y las velocidades de la madera sólida son más amplias en comparación con la dispersión de la madera laminada. La correlación de la velocidad, en función de la densidad para la madera sólida, muestra una amplia dispersión con una tendencia positiva y un coeficiente de determinación débil ($R^2 = 0,45$). En cambio, en la correlación correspondiente a la madera laminada, la tendencia es prácticamente nula ($R^2 = 0,01$). Sin embargo, se observa un agrupamiento en los valores, lo que verifica la disminución de su variabilidad.

Para ubicar las magnitudes de los resultados de esta investigación respecto a datos de la bibliografía, la tabla 22 detalla las densidades, velocidades y módulos dinámicos de 18 especies del género *Pinus* reportados por Sotomayor *et al.* (2010b). Las magnitudes de las velocidades radial, tangencial y longitudinal, de madera sólida y laminada de esta investigación, se sitúan al interior de los diferentes rangos de valores de referencia. En el mismo sentido, Dackermann *et al.* (2016) reportan para *Corymbia maculata* ($\rho_{CH} = 1060 \text{ kg m}^{-3}$) velocidades del ultrasonido de $v_{us} R = 1982 \text{ m s}^{-1}$, $v_{us} T = 1760 \text{ m s}^{-1}$ y $v_{us} L = 5555 \text{ m s}^{-1}$; y para *Eucalyptus microcorys* ($\rho_{CH} = 1090 \text{ kg m}^{-3}$) de $v_{us} R = 2095 \text{ m s}^{-1}$, $v_{us} T = 1820 \text{ m s}^{-1}$ y $v_{us} L = 5137 \text{ m s}^{-1}$. Valores cercanos a los de esta investigación y a los reportados en la tabla 3. Las relaciones de anisotropía de las velocidades para la madera sólida son $v_{us} T/v_{us} R = 0,72$ y $v_{us} L/v_{us} R = 1,86$; mientras que para la madera laminada son $v_{us} T/v_{us} R = 0,59$ y $v_{us} L/v_{us} R = 2,69$.

Estos resultados son similares a los que Sotomayor *et al.* (2010a), determinaron con ultrasonido para *P. michoacana*: $v_{us} T/v_{us} R = 0,64$ y $v_{us} L/v_{us} R = 2,74$; para *P. douglasiana*: $v_{us} T/v_{us} R = 0,65$

y $v_{us} L/v_{us} R = 3,04$; y para *P. pringlei*: $v_{us} T/v_{us} R = 0,78$ y $v_{us} L/v_{us} R = 3,01$. Si bien las relaciones muestran proporciones similares, las magnitudes son particulares a cada especie. Los valores precedentes son próximos a los calculados a partir de las velocidades por Dackermann *et al.* (2016) y detallados anteriormente para *Corymbia maculata* y *Eucalyptus microcorys*.

Módulos dinámicos

Los módulos dinámicos de la madera laminada disminuyen en la dirección radial (3%) y en la tangencial (35%) (Tabla 5). En contraste, los módulos dinámicos aumentan en la dirección longitudinal (101%). De manera análoga a las velocidades, los coeficientes de variabilidad de los módulos dinámicos disminuyen en las tres direcciones.

Caso particular son los módulos dinámicos en la dirección radial cuya diferencia aritmética entre los coeficientes de variabilidad es de 3%. Esto se refleja en el resultado de la prueba de medianas, la cual indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los módulos dinámicos de la madera sólida y la laminada (Tabla 6). Es decir, el proceso de laminado no modifica de manera significativa el módulo dinámico en esta dirección, pero sí disminuye su variación (Tabla 5). De manera diferente, para las direcciones tangencial y longitudinal las pruebas de hipótesis indican diferencias significativas. Es notorio que las distribuciones de las muestras de los módulos dinámicos radiales y tangenciales de la madera sólida son anormales, al igual que las distribuciones de las velocidades correspondientes. No obstante, se observan diferencias estadísticamente significativas para estas dos direcciones.

Una interpretación gráfica de estos resultados se ejemplifica en la figura 23 donde se presentan las correlaciones entre módulos dinámicos longitudinales y densidades de la madera sólida y laminada. De manera análoga al análisis de las velocidades (Fig. 22), el intervalo de las magnitudes de los módulos dinámicos de la madera laminada disminuye de manera importante, resultado que coincide con la diferencia de 101% entre medias de laminada *versus* sólida, registrada en la tabla 5. En este sentido, ambas correlaciones tienen tendencias similares pero el coeficiente de determinación correspondiente a la madera laminada es bajo en comparación con el de la madera sólida que es medio. Para el caso específico de los módulos longitudinales, estos resultados

sugieren que el laminado de la madera sólida de *P. pseudostrobus* aumenta y homogeniza sus magnitudes.

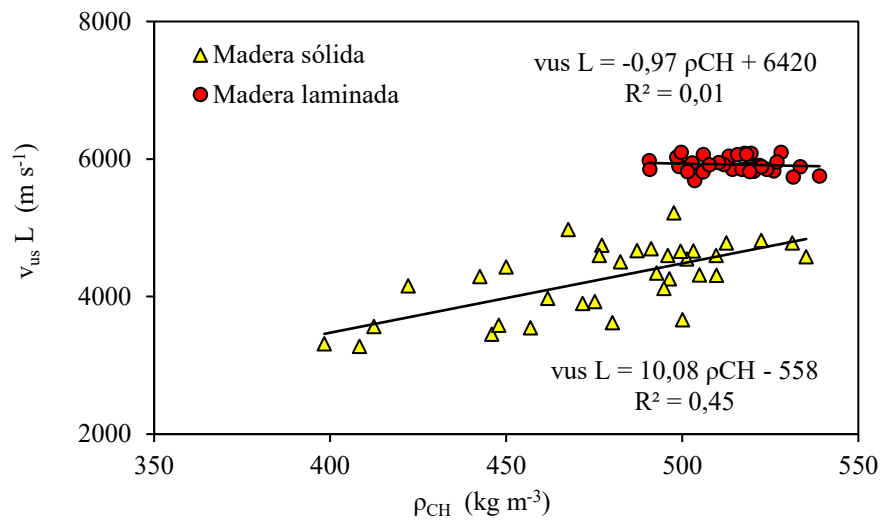


Figura 22. Correlaciones entre velocidades longitudinales y densidades.

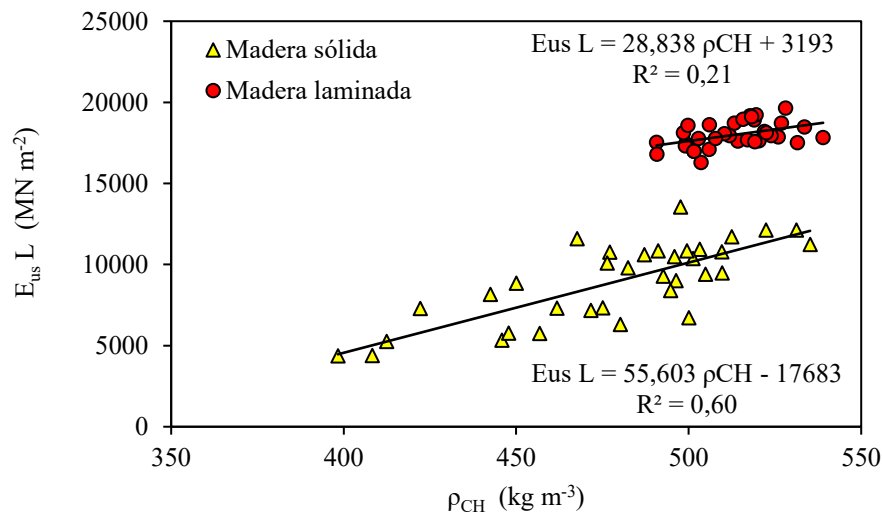


Figura 23. Correlaciones entre módulos dinámicos longitudinales y densidades.

La disminución en los módulos dinámicos en las direcciones radial y tangencial de la madera laminada es similar a la reportada por Nadir y Nagarajan (2014) para módulos de elasticidad determinados en flexión estática en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida de *Hevea brasiliensis* ($\rho_{CH} = 605 kg m^{-3}$). En efecto, estos autores reportan una disminución de 5% en madera

laminada en comparación con la madera sólida, pero no encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el módulo de elasticidad estático de la madera sólida y el de laminada.

En contraste, para probetas de pequeñas dimensiones de *Pinus pinaster* ($\rho_{CH} = 550 \text{ kg m}^{-3}$), Ribeiro *et al.* (2009) informan un incremento de 2% en los módulos de elasticidad en flexión estática de la madera laminada.

Por otra parte, estudiando probetas de pequeñas dimensiones de madera laminada compuesta de *Abies religiosa* ($\rho_{CH} = 415 \text{ kg m}^{-3}$), *Fraxinus uhdei* ($\rho_{CH} = 623 \text{ kg m}^{-3}$) y *Alnus acuminata* ($\rho_{CH} = 565 \text{ kg m}^{-3}$), Sotomayor y Ruiz (2017) concluyen que el módulo dinámico de la madera laminada, determinado con ultrasonido en la dirección longitudinal ($E_{us} = 12706 \text{ MN m}^{-2}$), mejora en comparación con el de madera sólida de *A. religiosa* ($E_{us} = 7258 \text{ MN m}^{-2}$), es menor al de *F. uhdei* ($E_{us} = 13183 \text{ MN m}^{-2}$) y similar al de *A. acuminata* ($E_{us} = 12833 \text{ MN m}^{-2}$). Estos investigadores sugieren considerar los resultados caso por caso. El incremento y/o decremento del módulo dinámico depende, por una parte, de la configuración de las pruebas y, por otra, de factores de variación como el adhesivo aplicado, la especie y/o la combinación de diferentes especies utilizadas, así como el acomodo y las características de los componentes de la madera laminada. En el mismo sentido, Burdurlu *et al.* (2007) reportan resultados combinados entre el módulo de elasticidad estático de *Fagus orientalis* ($\rho_{CH} = 703 \text{ kg m}^{-3}$) y *Populus nigra* ($\rho_{CH} = 400 \text{ kg m}^{-3}$) y los módulos correspondientes a diferentes combinaciones de estas especies en probetas de pequeñas dimensiones de madera laminada.

Las relaciones de anisotropía de la madera sólida de *P. pseudostrobus* (Tabla 5) son $E_{us} T/E_{us} R = 0,52$ y $E_{us} L/E_{us} R = 3,50$. De manera análoga a los resultados de las velocidades reportados por Sotomayor *et al.* (2010a), los resultados para los módulos dinámicos para especies del género *Pinus* muestran relaciones de anisotropía similares en las direcciones tangencia/radial, pero menores para las direcciones longitudinal/tangencial, para *P. michoacana*: $E_{us} T/E_{us} R = 0,40$ y $E_{us} L/E_{us} R = 7,75$; para *P. douglasiana*: $E_{us} T/E_{us} R = 0,46$ y $E_{us} L/E_{us} R = 9,25$; y para *P. pringlei*: $E_{us} T/E_{us} R = 0,56$ y $E_{us} L/E_{us} R = 7,20$. Por su parte, para el caso de madera clasificada para uso estructural, Ho (2017) reporta anisotropías de los módulos dinámicos por ultrasonido en madera sólida de *Larix kaempferi* ($\rho_{CH} = 578 \text{ kg m}^{-3}$) de $E_{us} T/E_{us} R = 0,72$ y $E_{us} L/E_{us} R = 6,11$. En el mismo contexto, para madera laminada, las relaciones de anisotropía de esta investigación son $E_{us} T/E_{us} R = 0,35$ y

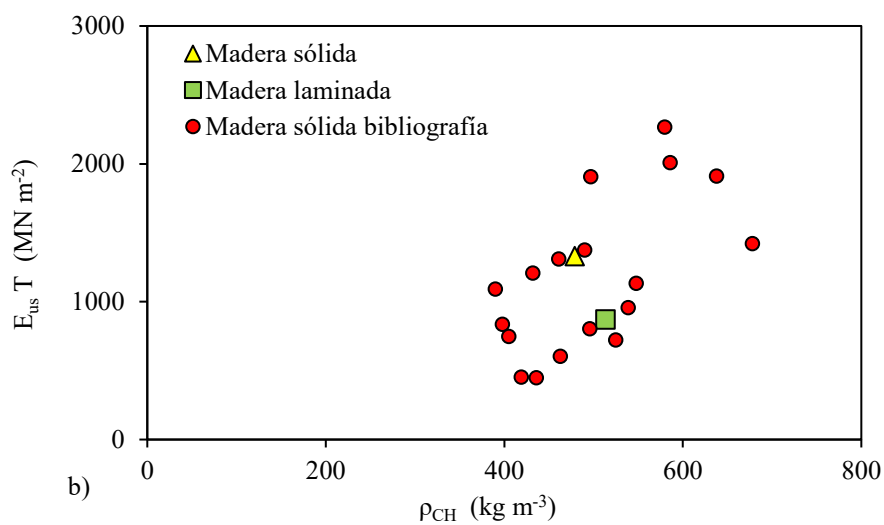
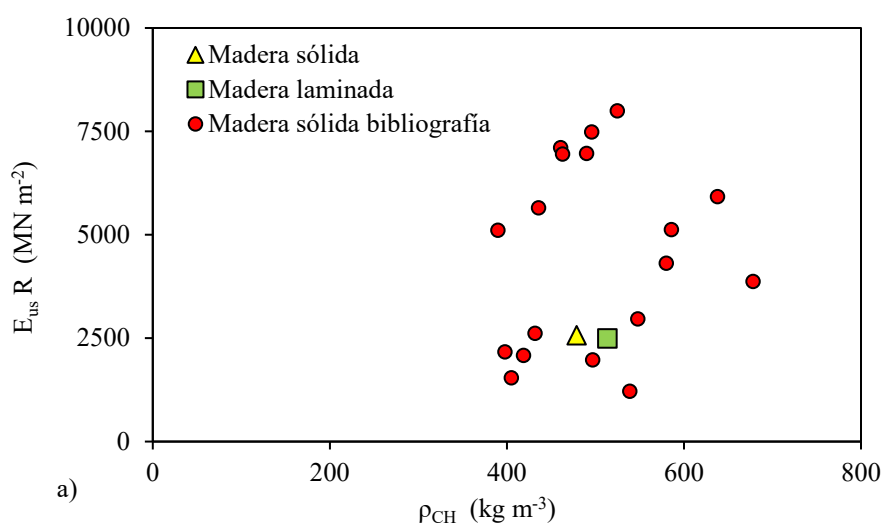
$E_{us} L/E_{us} R = 7,22$. Los resultados son similares a los reportados para madera sólida por los autores citados anteriormente.

A manera de síntesis, se puede inferir que las relaciones de anisotropía para madera sólida, publicadas en las investigaciones referidas, muestran proporciones similares a las de este trabajo, pero las magnitudes son particulares a cada especie. Empero, en la literatura revisada no se encontraron artículos que informen los datos de las relaciones de anisotropía para la madera laminada. Para posicionar los resultados de esta investigación respecto a los reportados para madera sólida de maderas mexicanas del género *Pinus* por Sotomayor *et al.* (2010b), detallados en la tabla 7, se presentan en la figura 24 las dispersiones de los módulos dinámicos en función de las densidades para las dirección radial, tangencial y longitudinal. En las tres direcciones, las magnitudes de esta investigación para la madera sólida y laminada se posicionan al interior de la nube de datos correspondiente a los resultados referenciados.

Tabla 7. Datos de la bibliografía (Sotomayor *et al.*, 2010b).

Género <i>Pinus</i>	ρ_{CH}	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$
Especies	(kg m ⁻³)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(MN m ⁻²)	(MN m ⁻²)	(MN m ⁻²)
<i>P. arizonica</i>	461	3713	1594	6020	7107	1309	18682
<i>P. ayacahuite</i>	398	2206	1370	5986	2169	836	15974
<i>P. cembroides</i>	525	3690	1108	3321	7994	721	6475
<i>P. coulteri</i>	419	2108	984	6023	2082	453	16997
<i>P. douglasiana</i>	405	1845	1283	5993	1543	747	16280
<i>P. durangensis</i>	390	3423	1581	6547	5112	1091	18695
<i>P. lawsonii</i>	586	2798	1751	4503	5127	2009	13283
<i>P. martinezii</i>	539	1418	1259	6222	1213	957	23353
<i>P. maximinoi</i>	432	2328	1581	6145	2618	1207	18238
<i>P. michoacana</i>	463	3663	1080	6518	6949	604	21999
<i>P. montezumae</i>	497	1883	1851	6307	1974	1906	22133
<i>P. oocarpa</i>	548	2200	1360	5338	2966	1134	17462
<i>P. patula</i>	496	3673	1204	7187	7482	804	28637
<i>P. ponderosa</i>	490	3563	1583	5532	6964	1374	16787

<i>P. pringlei</i>	580	2579	1868	6390	4315	2265	26495
<i>P. pseudostrobus</i>	436	3403	959	6514	5654	449	20711
<i>P. quadrifolia</i>	678	2260	1369	3857	3872	1421	11281
<i>P. teocote</i>	638	2881	1636	6075	5925	1910	26334
ρ_{CH} = Densidad; v = Velocidad del ultrasonido; E = Módulo dinámico; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.							



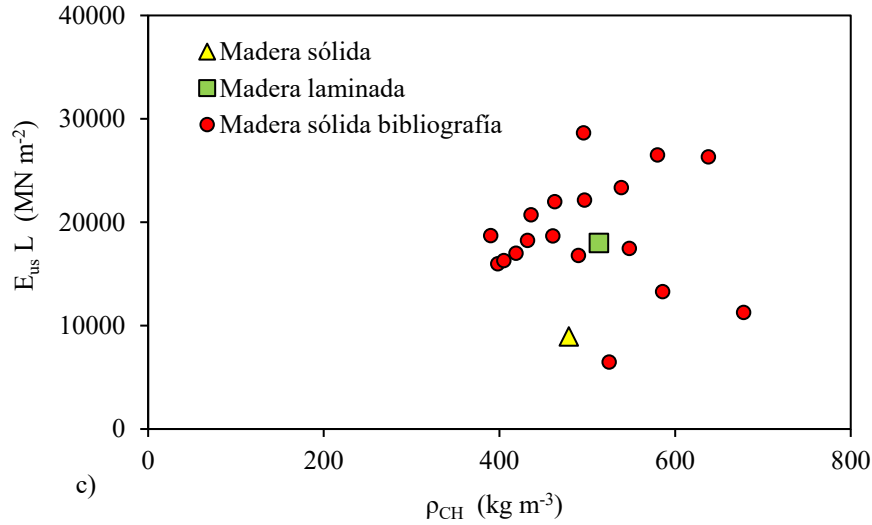


Figura 24. Dispersiones de módulos dinámicos en función de las densidades. a) Dirección radial; b) Dirección tangencial; c) Dirección longitudinal.

No obstante que los valores de los módulos dinámicos se sobreponen en la misma nube de datos, se observan diferencias entre especies y tipos de madera. Esta diversidad puede explicarse por la variabilidad natural en la magnitud de las características físicas que existe entre especies y al interior de una especie (Perré *et al.* 2016), por la heterogeneidad anatómica (Schubert *et al.*, 2009), por la anisotropía material (Brémaud *et al.* 2011) y por la higroscopicidad del tejido leñoso (Mvondo *et al.* 2017). La diversidad en las propiedades físico-mecánicas de la madera también depende tanto de factores genéticos como ambientales y se encuentra en todos los niveles de gimnospermas y angiospermas, entre árboles de climas tropicales y templados, entre poblaciones de una especie determinada, entre árboles de una población y, finalmente, en ubicaciones de muestreo dentro de un solo árbol (Zhang *et al.* 2011).

Una causa adicional que provoca la variabilidad del módulo dinámico de la madera son las diferentes configuraciones de las pruebas necesarias para calcular este parámetro (Bachtiar *et al.* 2017). Esta diversidad representa una ventaja para fines de cálculo ingenieril y para el diseño de productos a base de madera; sin embargo, se requiere considerar los resultados especie por especie.

Para minimizar el efecto de la propagación del ultrasonido en un medio finito, la distancia entre los sensores, es decir, la distancia de recorrido (d , Fig. 20), debe ser mayor a la longitud de onda (λ)

(Bartholomeu *et al.*, 2003). En esta investigación, las distancias entre sensores para las direcciones radial y tangencial (Fig. 20) son de 0,05 m, cantidad menor que la longitud de onda promedio en esta dirección (Tabla 8). En cambio, la distancia correspondiente a la dirección longitudinal de la madera sólida satisface este requerimiento, pero para el caso de la madera laminada la distancia de recorrido es 10% mayor que la magnitud de la longitud de onda. De tal forma, si se considera la irregularidad mencionada, la configuración de las pruebas de ultrasonido es adecuada para caracterizar la madera de *P. pseudostrobus*.

Tabla 8. Longitudes de onda y distancias de recorrido del ultrasonido.

Madera sólida			Madera laminada		
λ_R	λ_T	λ_L	λ_R	λ_T	λ_L
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,043	0,031	0,079	0,041	0,024	0,110
Madera sólida			Madera laminada		
d_R	d_T	d_L	d_R	d_T	d_L
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0,05	0,05	0,10	0,05	0,05	0,10
λ = Longitud de onda; d = Distancia de recorrido del ultrasonido; R = Dirección radial; T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.					

La influencia de la variabilidad de la madera a nivel microanatómico, que comprende células y fibras, puede moderarse eligiendo la frecuencia del emisor para que las longitudes de onda en el material se encuentren en un rango entre la dimensión máxima de los elementos anatómicos y la dimensión mínima de la muestra (Bucur y Declercq, 2006). En esta investigación, el diámetro máximo de las células/fibras en el plano radial-tangencial se estima en 0,001 m y el largo de las células/fibras en la dirección longitudinal en 0,005 m (Guitard y Gachet, 2004, Richter *et al.*, 2004, Wheeler *et al.*, 2007). Estos datos son menores que las dimensiones de las aristas de las probetas en las direcciones radial y tangencial que son de 0,05 m y de 0,10 m para la dirección longitudinal.

4.4. Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas.

Resumen

La variabilidad en los valores experimentales de la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico puede estar asociada al efecto de las propiedades intrínsecas de la madera y ser diferente entre especies y sus direcciones de anisotropía. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar estos parámetros en tres maderas mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus* spp., y en tres maderas japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*. Se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal; igualmente, se determinaron las relaciones de anisotropía y las longitudes de onda.

Los valores de las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos para las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* presentan una amplia diversidad entre especies y en una especie. Esta variabilidad se puede caracterizar con los coeficientes de variación y de determinación. Las pruebas de ultrasonido son útiles para confirmar el carácter anisotrópico de la velocidad del ultrasonido y del módulo de elasticidad de la madera. Para esto, es suficiente un tamaño de muestra de 35 probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

Palabras clave: anisotropía, coeficiente de determinación, coeficiente de variación, longitud de onda, tamaño de muestra, variabilidad en la madera.

Abstract

The variability in the experimental values of the density, the speed of ultra-sound, and the dynamic modulus may be associated with the effect of the intrinsic properties of wood, and they are different between species and their directions of anisotropy. To verify this hypothesis, the objective of

the investigation was to determine these parameters in three Mexican woods: *Pinus pseudostrobus*, *Ta-bebuia rosea*, and *Quercus spp*; and from three Japanese woods: *Paulownia tomen-tosa*, *Cryptomeria japónica*, and *Fagus crenata*. Ultrasound tests were performed in the radial, tangential, and longitudinal directions, and the anisotropy relationships and wavelengths were determined. The values of the densities, the speeds of ultrasound, and the dynamic modules for the woods of *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus spp*, *P. tomentosa*, *C. japonica*, and *F. crenata* present a wide and diverse range, both inter- and intra-species. This variability can be characterized with the coefficients of variation and determination. Ultrasound tests are useful for confirming the anisotropic character of ultrasound speed and modulus of elasticity of wood. For this, a sample size of 35 specimens oriented in the radial, tangential, and longitudinal directions is sufficient.

Keywords: anisotropy, coefficient of determination, coefficient of variation, sample size, variability in wood, wavelength.

Introducción

La densidad de la madera, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico varían entre especies y en un árbol [1]-[3]. Sus magnitudes están relacionadas con las principales propiedades básicas del material:

1. La variabilidad en la extensión de los parámetros físicos entre especies, árboles y localización relativa en cada individuo [4], [5].
2. La heterogeneidad en su organización jerárquica: volumen mínimo representativo a escala macroscópica, capa de crecimiento a nivel meso y pared celular en escala microscópica [6], [7].
3. La anisotropía de sus características físicas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal [8], [9].
4. La higroscopía del tejido celular que modifica las propiedades físicas de la madera [10], [11].

Asimismo, las particularidades de cada configuración experimental y la calidad tecnológica de las probetas amplían las diferencias en los valores reportados en la literatura [12], [13]. De tal forma, el valor numérico del módulo de elasticidad de una especie reportado en la literatura se relaciona con una densidad y se asocia con etiquetas referentes al contenido de humedad, a la dirección de anisotropía o al método de determinación. Además, las cotas tabuladas representan valores promedio acompañados de su desviación estándar o del coeficiente de variación [14], [15].

Existe evidencia empírica de que la densidad de la madera es un buen predictor del módulo dinámico determinado con pruebas que miden la velocidad del ultrasonido [3], [16]. Sin embargo, subsisten discrepancias en las correlaciones reportadas entre la densidad y la velocidad del ultrasonido. Algunas investigaciones obtienen fuertes coeficientes de determinación entre estos parámetros [17]-[19]; en cambio, otras reportan coeficientes de determinación débiles [20]-[22]. Estos corolarios se refieren, principalmente, a mediciones de las velocidades en la dirección longitudinal y son independientes de las especies en estudio o de la técnica experimental. Para las direcciones radial y tangencial, existe poca información sobre las relaciones entre la densidad y la velocidad del ultrasonido [11], [23].

Para caracterizar especies maderables y promocionar su uso como productos de ingeniería, el paradigma vigente es proporcionar datos derivados de pruebas en especímenes con dimensiones de empleo [24], [25]. Otro enfoque es la realización de pruebas con protocolos experimentales *ad hoc* para investigar el efecto de tratamientos y tecnologías que modifican las propiedades naturales de la madera [26], [27]. Así, los reportes usualmente no detallan el tamaño y la normalidad estadística de las muestras analizadas, ni datos de verificación de su varianza. Los estudios estadísticos se concentran en el análisis de varianza y se complementan con correlaciones entre las variables estudiadas.

La argumentación precedente sugiere que la variabilidad en los valores experimentales de la densidad, de la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico puede estar asociada al efecto de las propiedades intrínsecas de la madera. Tal interrogante guía esta investigación y se propone como hipótesis de trabajo que la variabilidad en las magnitudes de las densidades de la madera, de las velocidades del ultrasonido y de sus módulos dinámicos son diferentes entre especies y sus

direcciones de anisotropía. Con todo, esta variación es cuantificable.

Para verificar experimentalmente esta hipótesis, el objetivo de la investigación es determinar estos parámetros en muestras estadísticamente representativas de tres maderas mexicanas: *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus* spp., y de tres maderas japonesas: *Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*. La propuesta está delimitada al estudio de la madera representada por probetas de pequeñas dimensiones y libres de anomalías de crecimiento.

Metodología

La unidad experimental consistió en madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*. De cada especie se prepararon 35 probetas con dimensiones de 0,01 m en la dirección radial (R), de 0,15 m en la dirección tangencial (T) y 0,15 m en la dirección longitudinal (L). La madera se acondicionó a un contenido de humedad promedio del 11 % y se previó que no mostrara defectos de crecimiento.

Las densidades aparentes se calcularon con la relación peso-volumen. Las pruebas dinámicas consistieron en medir el tiempo de transmisión del ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal con el aparato V-Meter MK IV (Frecuencia (f) = 54 kHz, precisión = 0,1 μ s) marca James Instruments (figura 25). Las velocidades de propagación del ultrasonido se calcularon con las distancias de recorrido entre los intervalos de tiempo de transmisión (figura 26). Los módulos dinámicos se calcularon con la ecuación (6):

$$E_{us} = \rho_{CH} v_{us}^2 \quad (6)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico (N m⁻²)

ρ_{CH} = Densidad (kg m⁻³)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m s⁻¹)

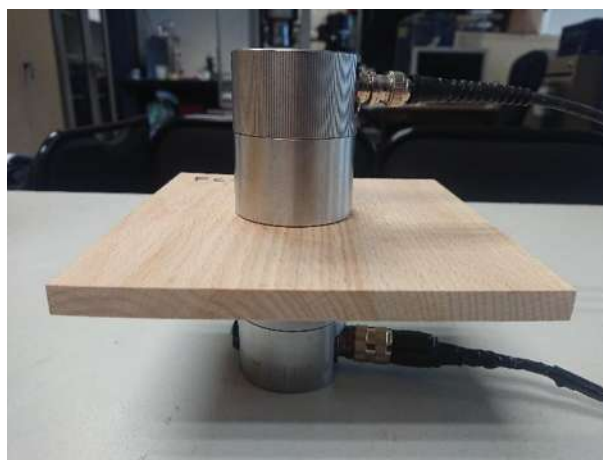


Figura 25. Pruebas de ultrasonido.

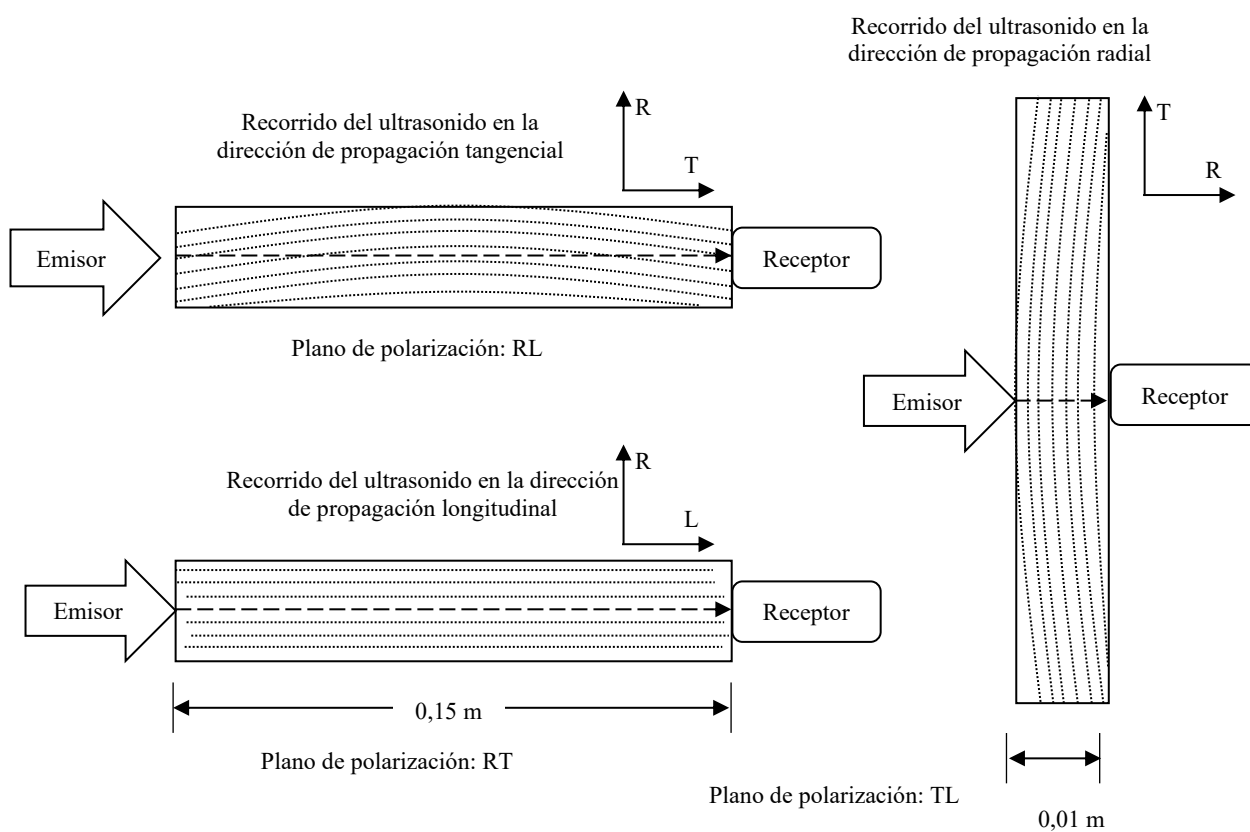


Figura 26. Configuración de las pruebas de ultrasonido

A. Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron las densidades y las velocidades. Los módulos dinámicos se consideraron variables derivadas (ecuación 6). Las variables se agruparon en muestras según las seis especies y las tres direcciones de medición. Para cada muestra, se calcularon las medias, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación. Se realizaron pruebas de normalidad, y cuando las pruebas indicaron distribuciones anormales, se procedió a realizar análisis de medianas de Kruskal-Wallis. Para cada grupo de seis muestras correspondientes a las seis especies, se verificó la igualdad de varianzas con la hipótesis $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0,05$).

A continuación, se practicaron análisis de varianza con la hipótesis nula $H_0: \bar{x}_1 = \bar{x}_2$ con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0,05$). El criterio de demarcación fue aceptar una diferencia estadísticamente significativa para valores $P_{(\alpha = 0,05)} \leq 0,05$. A fin de identificar cuáles niveles se diferenciaron en el análisis de varianza, se realizaron pruebas de rangos múltiples. Se calcularon las regresiones lineales y los coeficientes de determinación de las velocidades, así como los módulos dinámicos en función de las densidades. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación sugeridos por [22]: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. Se calcularon las relaciones de anisotropía entre las direcciones tangenciales y radiales. Los tamaños de las muestras se calcularon con la ecuación (7) y las longitudes de onda con la ecuación (8):

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (7)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05)

$$\lambda = v_{us} / f \quad (8)$$

Donde:

λ = Longitud de onda (m)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$)

f = Frecuencia del emisor (54 kHz)

Resultados y discusión

A. Densidades

Los valores medios y los coeficientes de variación de las densidades se enumeran en la tabla 9. Sus magnitudes son similares a las reportadas en la literatura para maderas mexicanas [28] y para las especies japonesas [29]-[31]. Las pruebas de normalidad indican valores del sesgo y del apuntamiento en el intervalo que marca el criterio de demarcación del diseño experimental. De tal forma, el análisis de varianza señala que las seis especies se diferencian entre ellas por su densidad. Sin embargo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para *P. pseudostrobus* y *F. crenata*.

Tabla 9. Densidades, velocidades y módulos dinámicos

Especies	ρ_{CH}	$v_{us\ R}$	$v_{us\ T}$	$v_{us\ L}$	$E_{us\ R}$	$E_{us\ T}$	$E_{us\ L}$
	($kg\ m^{-3}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($m\ s^{-1}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)	($MN\ m^{-2}$)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	620	2216	1355	6000	3043	1191	22 457
	(17) [#]	(5)	(13)	(4)	(19)	(38)	(21)
<i>Tabebuia rosea</i>	776	2127	1643	5183	3513	2141	20 943
	(10)	(6)	(11)	(6)	(13)	(30)	(17)
<i>Quercus spp.</i>	976	2391	1583	5835	5603	2447	33 276
	(3)	(7)	(4)	(3)	(14)	(8)	(8)
<i>Paulownia tomentosa</i>	266	2277	1203	4578	1389	390	5611
	(8)	(9)	(10)	(8)	(19)	(24)	(17)
<i>Cryptomeria japonica</i>	421	2039	1377	5064	1768	818	10 934

	(5)	(9)	(14)	(12)	(21)	(32)	(24)
<i>Fagus crenata</i>	629	2047	1757	4714	2644	1949	13 992
	(3)	(7)	(5)	(4)	(12)	(12)	(9)
ρ_{CH} = Densidad; v = Velocidad del ultrasonido; E = Módulo dinámico; us = Ultrasonido; R = Radial; T = Tangencial; L = longitudinal; #Coeficiente de variación en porciento.							

El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (tabla 10) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie; excepción hecha para *P. pseudostrobus* cuyo tamaño de la muestra mínimo requerido es de 46 probetas. El amplio intervalo de densidades medidas sugiere que la variabilidad en las magnitudes de las densidades es cuantitativamente diferente entre especies. Además, los valores mínimos de los coeficientes de variación son para *Quercus* spp. y *F. crenata* (3 %) y alcanzan un máximo para *P. pseudostrobus* (17 %).

Tabla 10. Tamaños necesarios de las muestras

	n	n	n
	<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Tabebuia rosea</i>	<i>Quercus</i> spp.
ρ_{CH}	46	17	2
v_{us} R	4	5	8
v_{us} T	25	20	2
v_{us} L	3	5	1
	<i>Paulownia tomentosa</i>	<i>Cryptomeria japonica</i>	<i>Fagus crenata</i>
ρ_{CH}	10	4	1
v_{us} R	13	14	7
v_{us} T	16	32	4
v_{us} L	9	22	4
ρ_{CH} = densidad; v = velocidad del ultrasonido; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal; n = tamaño necesario de la muestra.			

B. Velocidades del ultrasonido

Los valores medios y coeficientes de variación de las velocidades se enumeran en la tabla 9. Los coeficientes de variación son diferentes para cada especie y dirección de medida. No se distingue ninguna tendencia en la variación en cada muestra. Sus magnitudes son similares a las reportadas en la literatura para maderas mexicanas medidas con ultrasonido [28] y para las especies japonesas medidas con ondas de esfuerzo [32].

En las direcciones tangencial y longitudinal de la madera, las distancias de recorrido de la onda son de 0,15 m (figura 26). En estas direcciones, el área de contacto de las probetas es menor de la superficie de los sensores. En cambio, en la dirección radial, el tiempo de transmisión representa la medición de la superficie total de los sensores en contacto con la superficie de las probetas y la distancia de recorrido es de 0,01 m. Dado que la velocidad del ultrasonido está calculada a partir del tiempo de transmisión de un paquete de ondas delimitado por la superficie de contacto de los sensores emisor y receptor con diámetro de 0,05 m de diámetro, y debido a la forma de las probetas (figura 25), las distancias de recorrido son diferentes según la dirección de anisotropía y, posiblemente, influyen en la variación de los resultados.

Las regresiones entre las velocidades y las densidades, diferenciando especie por especie, indican coeficientes de determinación de nulos a muy bajos (tabla 11), con excepción de la velocidad longitudinal de *P. pseudostrobus* ($R^2 = 0,60$) que califica como medio. En el mismo tenor, considerando como una sola muestra el conjunto de velocidades de las seis especies (220 mediciones), los coeficientes de determinación entre las velocidades y las densidades van de correlación nula para las velocidades radiales a correlaciones bajas para las velocidades tangenciales y longitudinales. Dado que las regresiones se derivan de mediciones en muestras comunes, realizadas en semejantes condiciones experimentales y con el mismo aparato, el error de las mediciones, introducido en la predicción del parámetro dependiente y la precisión del parámetro medido para explicar el parámetro dependiente, está incluido en el valor de R^2 [33].

Tabla 11. Coeficientes de determinación

	$v_{us} R$	$v_{us} T$	$v_{us} L$	$E_{us} R$	$E_{us} T$	$E_{us} L$
	(R^2)	(R^2)	(R^2)	(R^2)	(R^2)	(R^2)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0,03	0,60	0,12	0,71	0,83	0,87
<i>Tabebuia rosea</i>	0,05	0,20	0,01	0,35	0,45	0,53
<i>Quercus spp.</i>	<0,01	0,04	0,31	0,03	0,05	0,64
<i>Paulownia tomentosa</i>	<0,01	0,04	0,01	0,15	0,28	0,29
<i>Cryptomeria japonica</i>	0,04	0,20	<0,01	0,18	0,31	0,03
<i>Fagus crenata</i>	0,07	0,31	0,08	0,01	0,47	<0,01
Promedio seis especies	0,04	0,38	0,29	0,84	0,82	0,86
v = velocidad del ultrasonido; E = módulo dinámico; us = ultrasonido; R = radial; T = tangencial; L = longitudinal; R^2 = coeficiente de determinación.						

Estos resultados son similares a los reportados por [20] sobre coeficientes de determinación bajos ($R^2 = 0,15$) asociados a correlaciones entre las velocidades longitudinales y las densidades de cinco especies. Estos investigadores concluyen que la velocidad del ultrasonido en la madera probablemente es influenciada por la microestructura de cada especie en particular y no recomiendan predecir la velocidad basándose solo en la densidad. En el mismo sentido, [34] reporta coeficientes de determinación bajos ($R^2 = 0,13$) en correlaciones entre velocidades longitudinales y densidades para 53 especies.

El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (ecuación 7) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie (tabla 10). No obstante, las pruebas de normalidad de las velocidades indican valores del sesgo y del apuntamiento fuera del intervalo que marca el criterio de demarcación del diseño experimental. Las pruebas de Kruskal-Wallis indican que las seis especies se diferencian entre ellas por su velocidad. Sin embargo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para diferentes pares de especies de acuerdo con las direcciones de anisotropía.

Las velocidades radiales son homogéneas para *C. japonica* con *F. crenata* y para *P. pseudostrobus* con *P. tomentosa*. Las velocidades tangenciales son similares para *P. pseudostrobus* y *C. japónica*

y para *Quercus* spp y *T. rosea*. Las velocidades longitudinales son homogéneas para *P. tomentosa* y *F. crenata*, así como para *C. japónica* y *T. rosea*.

Las anisotropías promedio calculadas (tabla 12) son $v_{us} T/R = 0,68$ y $v_{us} L/R = 2,4$. Estos valores son próximos a los reportados por [28] para maderas mexicanas: $v_{us} T/R = 0,45$ y $v_{us} L/R = 1,48$. Igualmente, las anisotropías son del mismo orden de las reportadas por [35] para *Eucalyptus globulus* ($\rho_{CH} = 854 \text{ kg m}^{-3}$): $v_{us} T/R = 0,67$ y $v_{us} L/R = 2,66$.

Tabla 12. Relaciones de anisotropía y longitudes de onda

Especies	R/R	T/R	L/R	R/R	T/R	L/R	λ_R	λ_T	λ_L
	v_{us}	v_{us}	v_{us}	E_{us}	E_{us}	E_{us}	(m)	(m)	(m)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	1,0	0,61	2,7	1,0	0,4	7,4	0,044	0,031	0,116
<i>Tabebuia rosea</i>	1,0	0,77	2,4	1,0	0,6	6,0	0,043	0,039	0,107
<i>Quercus</i> spp.	1,0	0,66	2,4	1,0	0,4	5,9	0,052	0,033	0,113
<i>Paulownia tomentosa</i>	1,0	0,53	2,0	1,0	0,3	4,0	0,055	0,027	0,095
<i>Cryptomeria japonica</i>	1,0	0,68	2,5	1,0	0,5	6,2	0,046	0,037	0,125
<i>Fagus crenata</i>	1,0	0,86	2,3	1,0	0,7	5,3	0,044	0,036	0,094
Promedio seis especies	1,0	0,68	2,40	1,0	0,49	5,80	0,047	0,034	0,108
v = Velocidad del ultrasonido; E = Módulo dinámico; us = Ultrasonido; R = Radial; T = Tangencial; L = Longitudinal; λ = Longitud de onda.									

La variabilidad de las velocidades entre especies se comprueba por la comparación de los valores medios para cada una de sus direcciones de anisotropía. De igual modo, la variabilidad en cada especie se demuestra con los diferentes coeficientes de variación. Estos resultados verifican la hipótesis en lo concerniente a poder cuantificar la variación y la anisotropía de las velocidades.

La influencia de la variabilidad de la madera a nivel microanatómico (que comprende células, rayos y canales resiníferos), así como a nivel mesoanatómico (que se refiere a una capa de crecimiento, compuesta de una capa de madera temprana y otra de madera tardía), puede moderarse eligiendo

la frecuencia del emisor para que las longitudes de onda en el material se encuentren en un rango entre la dimensión máxima de los elementos anatómicos y la dimensión mínima de la muestra [36]. En esta investigación, el diámetro máximo de las células/fibras o elementos de vaso en el plano radial-tangencial se estima en 0,001 m y en la dirección longitudinal el largo de las células/fibras o elementos de vaso en 0,005 m [6], [37], [38]. Estos datos son menores que las dimensiones de las aristas de las probetas en las direcciones tangencial y longitudinal en 0,15 m. Para la dirección radial, la arista es de 0,01 m.

Las longitudes de onda calculadas con la ecuación (7), utilizando las velocidades registradas en cada especie y dirección (tabla 12), son mayores que la longitud de onda prevista por la ecuación (8). En la figura 27, se esquematizan los valores del diámetro celular y del espesor máximo de una capa de crecimiento (0,01 m) considerado en esta investigación.

Las escalas de estos parámetros no son proporcionales para fines ilustrativos. En este sentido, las longitudes de onda son mayores que los diámetros celulares y los espesores de las capas de crecimiento en las direcciones radial y tangencial (figura 27). Para la dirección longitudinal, las longitudes de onda son también mayores que el largo de las células. Así, se puede suponer que la onda no se dispersó ni atenuó de manera significativa [36], [39].

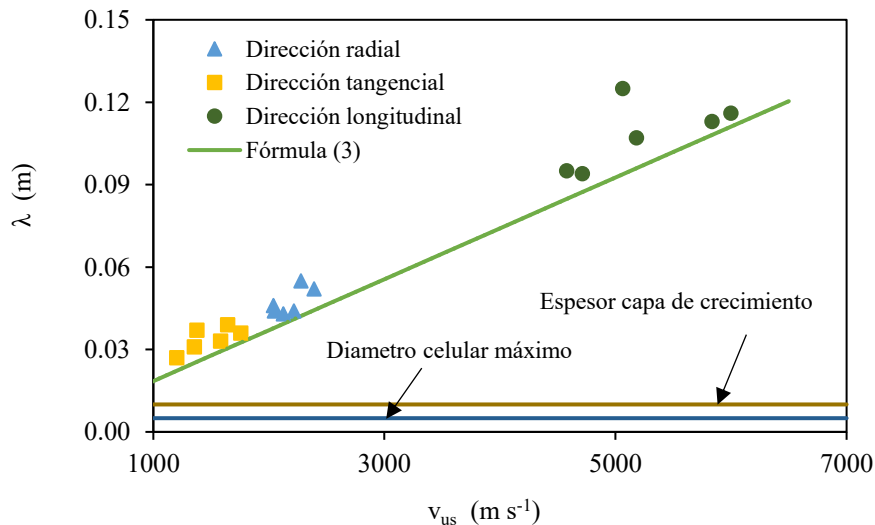


Figura 27. Longitudes de onda en función de las velocidades.

Las longitudes de onda promedio de esta investigación fueron $\lambda_R = 0,047$ m, $\lambda_T = 0,034$ m y $\lambda_L = 0,108$ m (tabla 4), que son similares a las reportadas por [39] para *Picea abies* ($\rho_{CH} = 476$ kg m⁻³), las cuales se calcularon a partir de velocidades de ultrasonido utilizando sensores con frecuencia de 50 kHz, similares a los de esta investigación ($\lambda_R = 0,045$ m, $\lambda_T = 0,040$ m y $\lambda_L = 0,120$ m).

Para minimizar el efecto de la propagación del ultrasonido en un medio finito, la distancia entre los sensores, es decir, la distancia de recorrido (d), debe ser mayor de la longitud de onda (λ) [40]. En esta investigación, la distancia entre sensores para la dirección radial (d_R) es de 0,01 m, cantidad menor que la longitud de onda en esta dirección ($\lambda_R = 0,24$ m, tabla 12). En cambio, las distancias correspondientes a las direcciones tangencial y longitudinal satisfacen este requerimiento. Así, d_T (0,15 m) es mayor 4,4 veces que λ_T (0,034 m) y d_L (0,15 m) es 1,4 veces mayor que λ_L (0,108 m). De tal forma, las mediciones en las direcciones tangencial y longitudinal son suficientes para caracterizar el fenómeno del ultrasonido en las probetas de esta investigación. Sin embargo, en la dirección radial, no son necesariamente tan precisas como las mediciones reportadas en [11] y [15] con probetas recortadas específicamente para medir la anisotropía con aparatos más precisos que el utilizado en esta investigación, lo que puede incrementar la variabilidad de las velocidades del ultrasonido.

C. Módulos dinámicos

Los valores medios y los coeficientes de variación de los módulos dinámicos se enumeran en la tabla 9. Sus magnitudes son similares a las reportadas para maderas mexicanas en la bibliografía [16]. Para las maderas japonesas, no se encontraron datos para su comparación; sin embargo, las magnitudes de los módulos dinámicos son menores y proporcionales a los medidos con ondas de esfuerzo [32]. Los coeficientes de variación son diferentes para cada especie y dirección de medida. No se distingue ninguna tendencia en la variación en cada muestra.

Las pruebas de normalidad de las muestras de módulos dinámicos indican irregularidades en sus distribuciones. Sin embargo, las pruebas de Kruskal-Wallis muestran que las seis especies se diferencian entre ellas por su módulo dinámico. Además, las pruebas de rangos múltiples

confirman diferencias de los módulos dinámicos entre las seis especies. El cálculo del número mínimo de probetas para asegurar un tamaño de muestra representativo (ecuación 7) fue menor que los 35 ejemplares observados por especie (tabla 10).

Las regresiones entre los módulos dinámicos y las densidades, diferenciando especie por especie, indican coeficientes de determinación desde nulos hasta altos (tabla 11). En el mismo tenor, considerando como una sola muestra el conjunto de velocidades de las seis especies (220 mediciones), los coeficientes de determinación entre los módulos dinámicos y las densidades son altos. Estos resultados son comparables con los reportados por [41] y [42] para modelos estadísticos de módulos dinámicos, determinados con ultrasonido, en función de las densidades. Las anisotropías promedio calculadas (tabla 12) son $E_{us} T/R = 0,49$ y $E_{us} L/R = 5,80$. Estos valores son mayores de los reportados por [28] para maderas mexicanas $E_{us} T/R = 0,18$ y $E_{us} L/R = 1,8$, y parecidos a los reportados por [35] para *Eucalyptus globulus* ($\rho_{CH} = 854 \text{ kg m}^{-3}$): $E_{us} T/R = 0,48$ y $E_{us} L/R = 9,07$. Estos datos bibliográficos fueron determinados con ultrasonido.

Las magnitudes de los módulos dinámicos varían, entre otros factores, a causa del contenido de humedad de la madera [11], [24] y de la temperatura [36], [43]. En esta investigación, estas dos fuentes de variación se conservaron constantes durante las pruebas de laboratorio, de tal forma que no influyeron en los resultados. Otra fuente de variación es la diversidad del tamaño, la forma y el acomodo de los diferentes componentes estructurales del plano leñoso. Así, el ultrasonido viajó a velocidad diferente según el tipo y la orientación relativa de los elementos anatómicos de cada probeta representativa de una especie de madera [44].

Para verificar la influencia de la estructura anatómica en la variabilidad de las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos de las maderas en estudio, es necesario cuantificar sus caracteres anatómicos y relacionarlos con los resultados experimentales, aspecto que va más allá de los alcances de esta investigación.

4.5. Módulos de rigidez de la madera sólida de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Resumen

La madera es un material biológico con aplicaciones en ingeniería y arquitectura. Su módulo de rigidez es útil para el cálculo de vigas que trabajan en flexión y en torsión, así como en conexiones entre elementos estructurales en edificaciones y en artículos de madera. El objetivo de la investigación fue determinar sus módulos de rigidez realizando pruebas de torsión dinámica. Se realizaron pruebas dinámicas de torsión en 105 probetas de pequeñas dimensiones de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Se determinaron los módulos de rigidez y los índices materiales. Se calcularon las correlaciones lineales y sus coeficientes de determinación de los módulos de rigidez en función de la densidad y de la frecuencia.

Los principales resultados son: Las magnitudes de las densidades de las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* se ubican al interior del intervalo reportado en la bibliografía. El coeficiente de variación de las frecuencias para *Q. scytophylla* es 50% menor comparativamente con los coeficientes de *P. pseudostrobus* y *T. rosea*. Los módulos de rigidez son similares a los reportados en la bibliografía para maderas con densidades equivalentes. El coeficiente de variación para *P. pseudostrobus* es 23% mayor que el de *T. rosea* y 146% mayor que el de *Q. scytophylla*. Se concluye que los valores reportados en esta investigación pueden ser útiles si estas especies de maderas se utilizan con fines estructurales. Se recomienda aplicar los protocolos de cálculo estructural requeridos por la normatividad en ingeniería de la madera.

Palabras clave: ingeniería, arquitectura, variabilidad de la madera, resistencia mecánica, tamaño de la muestra.

Abstract

Wood is a biological material with applications in engineering and architecture. Its modulus of rigidity is useful for the calculation of beams that work in bending and torsion, as well as in connections between structural elements in buildings and in wooden articles. The objective of the research was to determine their modulus of rigidity by performing dynamic torsion tests. Dynamic torsion tests were performed on 105 small specimens of *P. pseudostrobus*, *T. rosea* and *Q. scytophylla*. The rigidity moduli and the material indices were determined. Linear correlations and their coefficients for determining the modulus of stiffness as a function of density and frequency were calculated. The main results are: The magnitudes of the wood densities of *P. pseudostrobus*, *T. rosea* and *Q. scytophylla* are located within the interval reported in the bibliography. The coefficient of variation of the frequencies for *Q. scytophylla* is 50% lower compared to the coefficients of *P. pseudostrobus* and *T. rosea*. The rigidity moduli are similar to those reported in the literature for woods with equivalent densities. The coefficient of variation for *P. pseudostrobus* is 23% greater than that of *T. rosea* and 146% greater than that of *Q. scytophylla*. It is concluded that the values reported in this research may be useful if these wood species are used for structural purposes. It is recommended to apply the structural calculation protocols required by the wood engineering regulations.

Keywords: engineering, architecture, wood variability, mechanical strength, sample size

Introducción

La madera es un material de origen biológico con amplias aplicaciones en ingeniería y arquitectura (Jacob y *et al.*, 2018). Como consecuencia, las magnitudes de sus propiedades físicas denotan una amplia variabilidad entre especies, árboles y al interior de un mismo individuo (Malesza, 2015). Además, las características de resistencia mecánica de una misma especie varían según la técnica empleada en su determinación (Chauhan y Sethy, 2016) y el contenido de humedad de la madera (Jaskowska-Lemanska y Przesmycka, 2020). De tal forma, su caracterización requiere del estudio de especie por especie.

El módulo de rigidez es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes; por ejemplo, en vigas que trabajan en flexión y en torsión, así como en conexiones entre elementos estructurales en edificaciones y en artículos de madera (Echenique y *et al.*, 2015). En el mismo contexto, el aserrío de madera produce usualmente paralelepípedos para uso estructural, recortados en el plano radial-tangencial con al menos dos de sus caras mostrando planos longitudinales-tangenciales. De esta forma, cuando la madera está en servicio, trabaja como viga en flexión o como elemento resistente en productos compuestos de madera. Así, el módulo de rigidez para el plano longitudinal-tangencial es el parámetro necesario para el diseño de productos (Brandner y *et al.*, 2018) y estructuras de madera (Rocco y *et al.*, 2017).

Una de las tendencias contemporáneas en investigación en ciencias y tecnología de la madera es caracterizar el comportamiento mecánico de una especie en particular para sugerir su utilización en productos de valor agregado. Los datos publicados son derivados de experimentos realizados con probetas con dimensiones específicas de acuerdo al protocolo experimental aplicado (Llana y *et al.*, 2020). Sin embargo, el utilizador de piezas de madera en la práctica adquiere piezas de madera aserrada que no representan necesariamente a la madera observada en condiciones de laboratorio. En este contexto, existen pocos estudios comparativos de módulos de rigidez de maderas determinados con diferentes enfoques experimentales. La bibliografía sobre el tema de investigación es limitada en cuanto al número de trabajos publicados recientemente.

La Tabla 13 presenta una selección de datos recolectados en la literatura sobre la densidad, el módulo de rigidez y el índice material de diferentes especies.

Tabla 13. Datos de densidades, módulos de rigidez de la bibliografía e índices materiales.

Especie	ρ_{CH}	G_{LT}	I_{tor}^*	Referencia
	(kg m ⁻³)	(MN m ⁻²)		
<i>Paulownia tomentosa</i>	300	703	2,34	Komán y Feher (2017)
<i>Thuja plicata</i>	353	320	0,91	Sotomayor y Villaseñor (2016)
<i>Cryptomeria japonica</i>	360	784	2,18	Anshari y <i>et al.</i> (2011)
<i>Picea sitchensis</i>	390	720	1,85	Wang y <i>et al.</i> (2018)
<i>Abies balsamea</i>	393	575	1,46	Hernández y Sotomayor (2014)

<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	1,90	Roohnia y Kohantorabi (2015)
<i>Picea sitchensis</i>	400	400	1,00	Yoshihara (2012)
<i>Picea abies</i>	465	863	1,86	Kránitz y <i>et al.</i> (2014)
<i>Picea abies</i>	472	744	1,58	Olsson y Källsner (2013)
<i>Pinus densiflora</i>	510	981	1,92	Cha (2015)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	540	922	1,71	Sotomayor (2015)
<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	1,48	Sotomayor (2016)
<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	1,67	Nadir y <i>et al.</i> (2014)
<i>Taxus baccata</i>	650	1650	2,54	Keunecke y <i>et al.</i> (2007)
<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	1,47	Ozyhar y <i>et al.</i> (2013)
<i>Andira inermis</i>	716	1084	1,51	Sotomayor (2018a)
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	716	1328	1,85	Sotomayor (2016)
<i>Fagus crenata</i>	740	637	0,86	Naruse (2003)
<i>Psidium sartorianum</i>	789	1067	1,35	Sotomayor (2018a)
<i>Juglans pyriformis</i>	810	1369	1,69	Sotomayor (2018a)
<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	1511	1,83	Sotomayor (2018a)
<i>Albizia plurijuga</i>	844	1792	2,12	Sotomayor (2018a)
<i>Quercus scytophylla</i>	933	1294	1,39	Sotomayor (2015)
<i>Acosmium panamense</i>	1005	1622	1,61	Sotomayor (2018a)
<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	2320	2,12	Sotomayor (2018a)
<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	1,90	Sotomayor (2016)
ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez: $*I_{tor}$ = Índice material ($m^2 s^{-2} \times 10^{-6}$).				

Los autores referidos en la Tabla 13 emplean diferentes estrategias para determinar los módulos de rigidez en el plano longitudinal-tangencial (G_{LT}). Entre los métodos que utilizan se pueden mencionar: las frecuencias de vibraciones torsionales en placas de madera posicionadas como vigas en voladizo (Wang y *et al.*, 2018); los ensayos de compresión estática (Hernández y Sotomayor, 2014); la utilización de vibraciones transversales (Sotomayor, 2018a); ensayos de compresión estática (Anshari y *et al.*, 2011); el estudio de placas de madera con frecuencias derivadas de vibraciones torsionales (Roohnia y Kohantorabi, 2015; Sotomayor, 2016); pruebas de flexión estática con cuatro puntos, complementadas con el método del elemento finito (Naruse, 2003);

uso de ultrasonido (Ozyhar y *et al.*, 2013); pruebas de cortante estática (Nadir y *et al.*, 2014); valores de módulos G_{LT} estimados a partir de modelos teóricos (Sotomayor, 2015); pruebas de cortante estática (Komán y Feher, 2017); utilización de ultrasonido (Keunecke y *et al.*, 2007; Kránitz y *et al.*, 2014); empleo de placas de madera deformadas en torsión estática (Yoshihara, 2012); combinación de pruebas de flexión estática y dinámica con el método del elemento finito (Olsson y Källsner, 2013); ondas de esfuerzo (Cha, 2015); y el estudio de placas de madera con vibraciones torsionales en el plano tangencial-longitudinal (Sotomayor y Villaseñor, 2016).

La variabilidad en las magnitudes de la densidad y del módulo de rigidez amplía la prospectiva para diseñar productos a base de madera. Así, la selección de una especie empleando índices materiales como criterio de preferencia es conveniente para especificar los valores mínimos admisibles para el análisis estructural y puede utilizarse para reglamentos de edificación con madera (Sotomayor, 2018b). En este contexto, el índice material de una pieza de madera que trabaja en torsión es el parámetro que relaciona su módulo de rigidez con su densidad. Además, es un indicador sobre la calidad de la madera para usos constructivos. Un alto índice material de una madera sugiere una mejor resistencia en relación con la densidad, y una buena apreciación como material de ingeniería (Ashby, 2011).

En los trabajos citados, se registra variabilidad en los resultados según la especie en estudio, así como la técnica empleada para la determinación de los módulos de rigidez. Se observa igualmente que sus magnitudes aumentan proporcionalmente a la densidad de las maderas. Así, surge la pregunta de investigación si las magnitudes del módulo de rigidez determinado en piezas de madera comercial son similares a los datos reportados en la bibliografía calculados con probetas ex profeso para fines de investigación. Esta inquietud refiere a los códigos de construcción con madera que establecen protocolos para la determinación de parámetros de ingeniería y especifican ajustes para el cálculo y diseño de estructuras de madera (American Wood Council, 2015; Canadian Wood Council, 2017).

Los factores que se toman en cuenta para satisfacer los criterios de diseño son, entre otros: la duración de la carga, la variabilidad natural de la madera, las condiciones especiales de servicio, la geometría de la pieza y el tipo de ensayo del cual proviene el esfuerzo permisible calculado; los

defectos, magnitud, frecuencia y combinación de irregularidades tales como nudos, desviación del grano, rajaduras, ondulación y degradación biológica; y el factor de corrección para el contenido de humedad en servicio, dependiendo de la exposición a la intemperie o a fuentes cercanas de humedad (American Institute of Timber Construction, 2012).

Como hipótesis de trabajo, la investigación plantea que las magnitudes de los módulos de rigidez de las maderas comerciales *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía, pero diferentes entre especies. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar sus módulos de rigidez realizando pruebas de torsión dinámica.

La verificación de la hipótesis pretende proporcionar certeza para el usuario de la madera de que los datos obtenidos en laboratorio, con los ajustes requeridos por la normatividad, son confiables en el cálculo y diseño de productos de madera. Para complementar el estudio, se calculan los índices materiales para datos reportados en la bibliografía y se comparan con los índices materiales de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, calculados en esta investigación.

Materiales y métodos

Se adquirieron lotes de madera aserrada y estufada en un establecimiento comercial en la ciudad de Morelia, México y se prepararon probetas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. No se mezclaron muestras de diferentes especies de un solo género. El taxón botánico se identificó en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. La madera no contenía defectos de crecimiento tales como nudos o desviación de la fibra. Las dimensiones de las probetas fueron 0,02 m de espesor por 0,15 m de ancho y 0,15 m de largo, alineadas de tal forma que las dimensiones correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) y una humedad relativa del aire de 65% ($\pm 5\%$) hasta que la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio promedio de 8%.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad, se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14 (American Society for Testing and Materials, 2015a) y siguen el procedimiento descrito en Sotomayor (2016). La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz (Figura 28). La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo que ocasionó vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma, que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial.

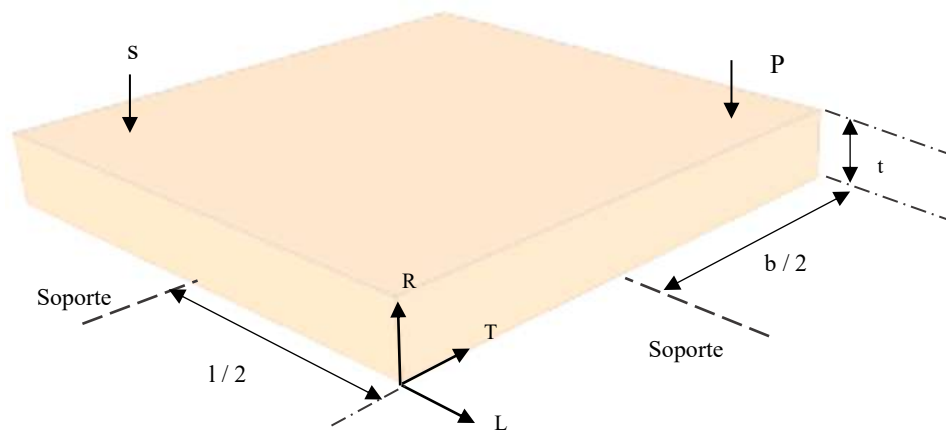


Figura 28. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho). Adaptado de la norma ASTM C1259-15.

De acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) en cada una de las 35 probetas de cada especie se aplicó un impacto empleando una esfera de acero de 0,005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0,01 m de longitud y de 0,002 m de espesor por 0,007 m de ancho.

El impacto fue aplicado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0,25 del ancho (b) y a 0,25 del largo (l) de cada espécimen (Figura 28). Empleando un aparato Grindosonic® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en el punto (s), en una posición simétrica respecto al punto de impacto.

La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0,005%. El módulo de rigidez es rubricado con el subíndice LT para identificarlo como derivado de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (9) (American Society for Testing and Materials, 2015b):

$$G_{LT} = \frac{4 l m f^2}{b t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (9)$$

Con :

$$A = \frac{0,5062 - 0,8776 \left(\frac{b}{t} \right) + 0,3504 \left(\frac{b}{t} \right)^2 - 0,0078 \left(\frac{b}{t} \right)^3}{12,03 \left(\frac{b}{t} \right) + 9,892 \left(\frac{b}{t} \right)^2}$$

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left(\frac{t}{b} \right) - 2,52 \left(\frac{t}{b} \right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{b} \right)^6}$$

Donde:

G_{LT} = Módulo de rigidez (N m⁻²)

f = Frecuencia natural (Hz)

m = masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m)

t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m)

A y B = Factores de ajuste geométrico

El índice material se calculó con la fórmula (10) (Ashby, 2011):

$$I_{\text{tor}} = G_{\text{LT}} / \rho_{\text{CH}} \quad (10)$$

Donde:

I_{tor} = Índice material ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

G_{LT} = Módulo de rigidez (MN m^{-2})

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3})

Diseño experimental

La estrategia experimental se orientó hacia la comparación de resultados entre especies. Se observaron 35 probetas por cada especie. Las variables de respuesta fueron los valores de la densidad (ρ_{CH}) y de la frecuencia (f); el módulo de rigidez (G_{LT}), calculado con la fórmula (9) y el índice material (I_{tor}), calculado con la fórmula (10), son variables derivadas. De tal forma, se formaron nueve muestras independientes (tres variables $\times$ tres especies). Para cada muestra se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($\text{CV} = \sigma/\mu$). Se calcularon las correlaciones lineales ($y = ax + b$) y los coeficientes de determinación (R^2) de los módulos de rigidez en función de la densidad y de la frecuencia. Igualmente, se calculó la correlación lineal entre el índice material y la densidad y se complementaron con correlaciones empleando datos de la bibliografía (Tabla 1).

Los cálculos estadísticos se efectuaron con el programa Stagraphics Centurion XV. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$.

Para validar en número de probetas medidas en cada una de las tres especies se calculó el tamaño de la muestra con la fórmula (11) (Gutiérrez y De la Vara, 2009):

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (11)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05).

Resultados

Densidades.

Las magnitudes de las densidades de las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* se ubican al interior del intervalo reportadas en la bibliografía (Tabla 1). El coeficiente de variación de *P. pseudostrobus* es 125% más grande respecto al de *T. rosea* y *Q. scytophylla* (Tabla 14). Asimismo, los coeficientes de variación se sitúan al interior del rango para las especies estudiadas en esta investigación (Sotomayor, 2015).

Tabla 14. Resultados de las pruebas de vibraciones en torsión

	ρ_{CH}	f	G_{TL}	I_{tor}
	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)	(m ² s ⁻² × 10 ⁻⁶)
<i>P. pseudostrobus</i>				
μ	587	1088	906	1,54
σ	48	77	146	0,22
CV	(8,2)	(7,1)	(16,2)	(14,2)
<i>T. rosea</i>				
μ	565	1115	915	1,62
σ	21	68	121	0,21
CV	(3,7)	(6,1)	(13,2)	(13,1)

<i>Q. scytophylla</i>				
μ	735	1059	1068	1,45
σ	25	30	71	0,09
CV	(3,4)	(2,8)	(6,6)	(6,2)
ρ_{CH} = densidad; f = Frecuencia; G_{LT} = Módulo de rigidez; I_{tor} = Índice material; μ = Media; σ = desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.				

Frecuencias.

Las frecuencias medidas de las tres maderas son similares entre sí (Tabla 14). Sin embargo, el coeficiente de variación de *Q. scytophylla* es 50% menor comparativamente con los coeficientes de *P. pseudostrobus* y *T. rosea*. Estos valores son razonables en mediciones de frecuencias en torsión en maderas (Sotomayor y Villaseñor, 2016).

Módulos de rigidez.

Los módulos de rigidez calculados con la fórmula (9) son similares a los reportados en la bibliografía para maderas con densidades equivalentes (Tabla 13). El coeficiente de variación para *P. pseudostrobus* es 23% mayor que el de *T. rosea* y 146% mayor que el de *Q. scytophylla*, valores aceptables en caracterización mecánica de la madera (Sotomayor, 2018a).

Índices materiales.

Para las tres especies estudiadas en esta investigación, sus índices materiales calculados con la fórmula (10) y listados en la Tabla 14 son comparables a los calculados a partir de datos de la bibliografía para especies con densidad similar (Tabla 13). El índice material de *T. rosea* es 5,2% mayor respecto al de *P. pseudostrobus*, una especie considerada en esta investigación como referencia por su uso extendido en la industria de la madera. En cambio, el de *Q. scytophylla* es 5,8% menor.

Tamaño de la muestra.

Para las tres maderas el número de probetas observadas por especies fue de 35 unidades, cantidad mayor al tamaño de muestra necesario para satisfacer el requisito de una muestra representativa calculado con la fórmula (11). Así, el tamaño de muestra en función del error aceptable para la densidad (Figura 29) y la frecuencia (Figura 30) convergen hacia los valores presentados en la Tabla 15.

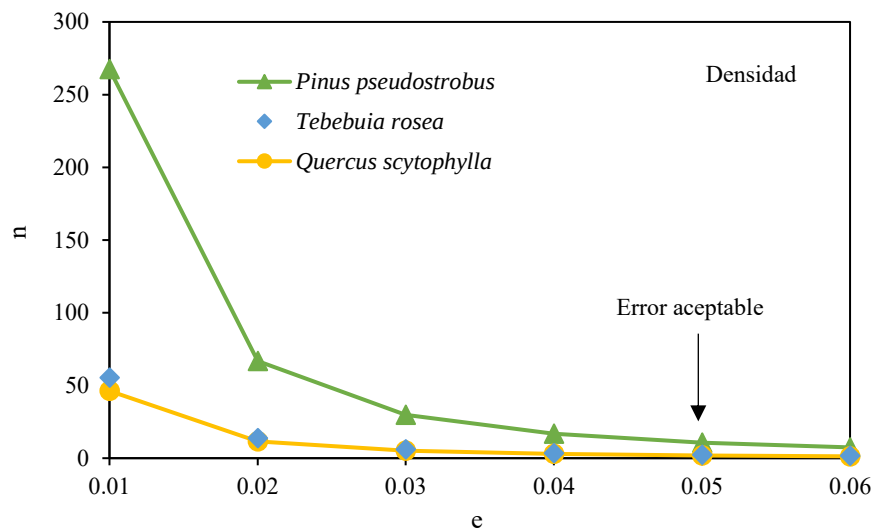


Figura 29. Cálculo del tamaño de la muestra (n) para la densidad (ρ_{CH}) en función del error aceptable (e).

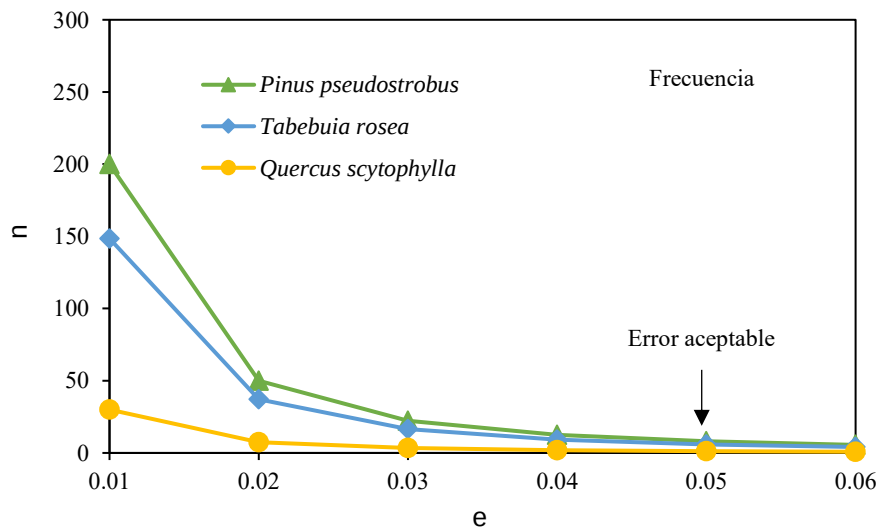


Figura 30. Cálculo del tamaño de la muestra (n) para la frecuencia (f) en función del error aceptable (e).

Tabla 15. Resultados del cálculo del tamaño de la muestra.

Especies	e	ρ_{CH}	f
	-	n	n
<i>P. pseudostrobus</i>	0,05	11	8
<i>T. rosea</i>	0,05	2	6
<i>Q. scytophylla</i>	0,05	2	1
e = Error de estimación aceptable; ρ_{CH} = densidad; f = Frecuencia; n = Número de muestra.			

Discusión

La frecuencia natural en vibraciones por torsión aumenta cuando la densidad de la madera incrementa. La frecuencia natural es un predictor del módulo de rigidez con una correlación de $G_{LT} = 3,41 \rho_{CH} - 7,288$ y $R^2 = 0,81$. Los valores del G_{LT} de las tres especies mexicanas son similares a los módulos de rigidez para el plano longitudinal-tangencial determinados por los autores Naruse (2003), Keunecke y *et al.* (2007), Yoshihara (2012), Ozyhar y *et al.* (2013), Kránitz y *et al.* (2014), Nadir y *et al.* (2014) y Sotomayor (2015), para maderas con densidades y contenidos de humedad similares a los determinados en el presente estudio.

El estudio demuestra que para las especies de madera de *P. pseudostrobus* y *T. rosea* la frecuencia es un buen predictor del módulo de rigidez. Sus correlaciones califican como altas. Sin embargo, para la madera de *Q. scytophylla* el coeficiente de determinación del modelo de predicción lineal califica como una correlación media (Figura 31). Este estudio revela una observación interesante sobre la divergencia en la correlación entre el módulo de rigidez y la densidad. Al interior de una misma especie, la variabilidad natural de la madera ocasiona que el módulo de rigidez no correlacione bien con la densidad. No obstante, los valores promedio se sitúan en la tendencia lineal que resulta de la correlación calculada con los valores reportados en la bibliografía.

Así, la investigación demuestra que la densidad y los módulos de rigidez de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son diferentes entre especies, pero de la misma magnitud que los correspondientes a otras especies de densidad similar. La validez de este corolario se restringe al

estudio de una muestra de madera, representativa de las tres especies, y a los resultados obtenidos de pruebas dinámicas de torsión.

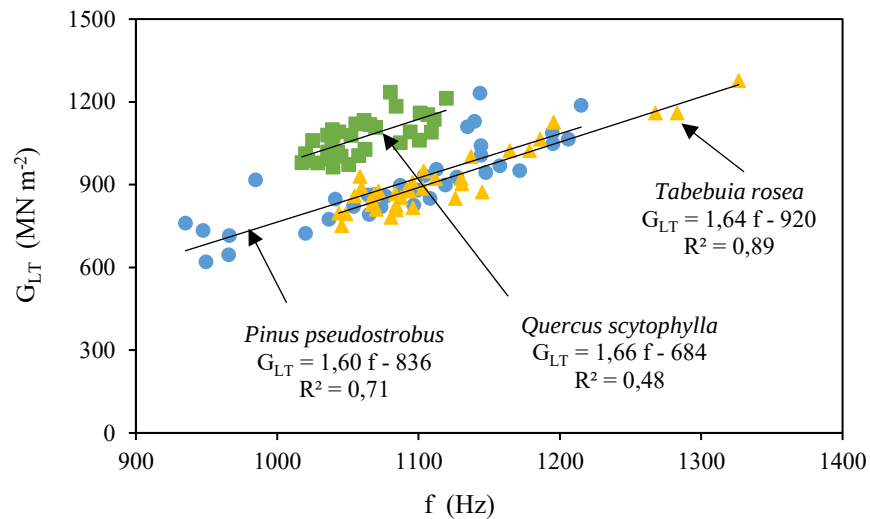


Figura 31. Correlaciones entre el módulo de rigidez (G_{LT}) y la frecuencia (f).

Los valores determinados del módulo de rigidez presentan variabilidad en dos aspectos. Por una parte, al interior de una misma especie, las mediciones correlacionadas en función de su densidad muestran una amplia dispersión explicada por coeficientes de regresión nulos (Figura 32). Para *T. rosea* el coeficiente de determinación indica una relación inexistente. Este parámetro mejora para *Q. scytophylla* y *P. pseudostrobus*. Posiblemente, la madera adquirida para esta investigación clasificada comercialmente como de un mismo género contiene piezas de diferentes especies y de varios árboles.

Por otra parte, se observa que los valores promedio de esta investigación se posicionan cerca de la correlación $G_{LT} = f(\rho_{CH})$ calculada con los datos de la bibliografía (Figura 6), la cual califica como alta de acuerdo a los criterios propuestos en el diseño experimental. Además, la correlación de los tres valores promedio de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*, resulta con un coeficiente de determinación 29% mayor al calculado para las 26 especies detalladas en la Tabla 13.

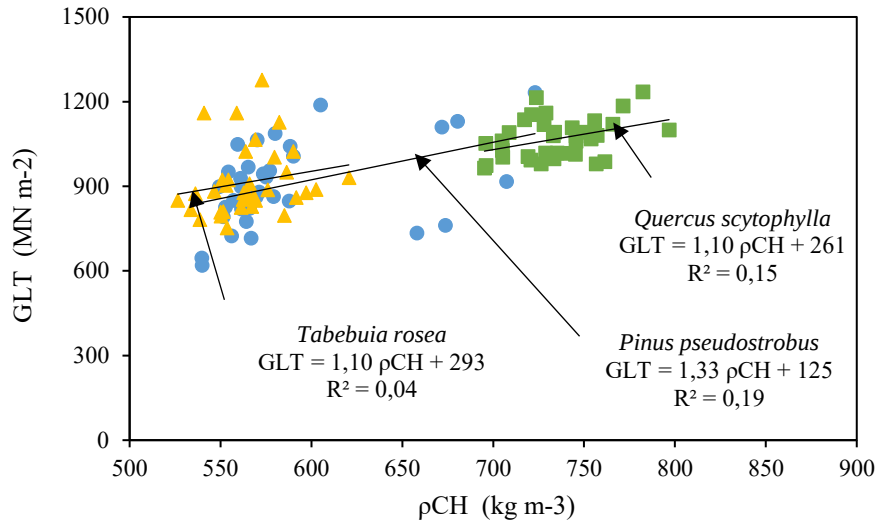


Figura 32. Correlaciones entre el módulo de rigidez (GLT) y la densidad (ρ_{CH}).

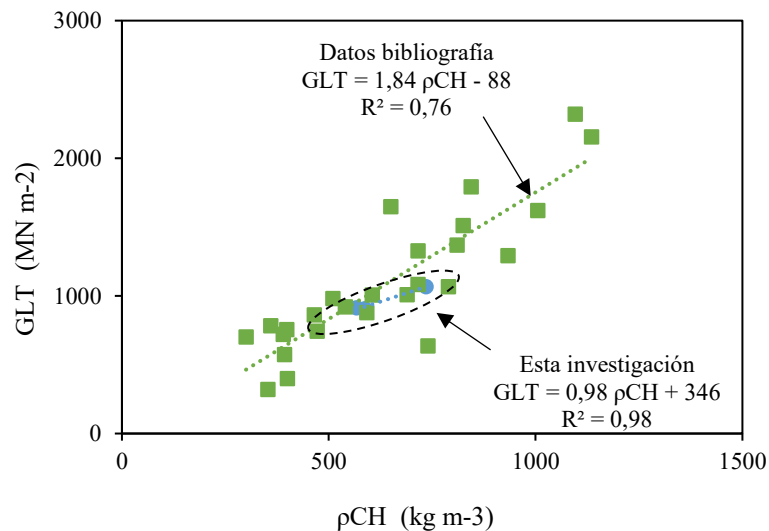


Figura 33. Correlaciones entre los módulos de rigidez (GLT) y las densidades (ρ_{CH}) con datos de la bibliografía (Tabla 13) y resultados de esta investigación.

Estos resultados coinciden con los reportados por Sotomayor (2016) quien, utilizando un procedimiento experimental similar al de la presente investigación, reporta que el módulo de rigidez de la madera aumenta proporcionalmente a su densidad para siete especies tropicales. Igualmente, Sotomayor (2018) confirma este paradigma, pero aplicando vibraciones transversales en 22 maderas. Sin embargo, Olsson y Källsner (2013) y Cavalli y *et al.* (2017) reportan que, para

el caso de piezas de madera aserrada con dimensiones de empleo, tales como tablas, tablonés y vigas, los coeficientes de determinación entre módulo de rigidez y densidad son de $R^2 = 0,22$.

Los resultados de laboratorio ensayando probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos, como es el caso de la presente investigación, no son necesariamente similares a los resultados obtenidos con piezas de grandes dimensiones que tienen nudos y/o anomalías de crecimiento. De aquí se induce que para obtener datos útiles en cálculo ingenieril es recomendable experimentar con piezas de dimensiones reales de empleo. Los valores reportados en esta investigación pueden ser útiles si estas especies de maderas se utilizan con fines estructurales. Sin embargo, las magnitudes son solo indicativas y no representan el promedio de las especies debido al número limitado de muestras analizadas. Se recomienda aplicar los protocolos de cálculo estructural requeridos por la normatividad en ingeniería de la madera.

El índice material de la madera es la combinación de las propiedades físico-químicas, las cuales caracterizan su rendimiento para una aplicación específica (Ashby, 2011). Por ejemplo, un buen diseño de estructuras de madera puede contribuir a mejorar el ambiente sonoro en construcciones, gracias a las propiedades acústicas del material. Entre otros indicadores de calidad de los materiales de construcción, el índice material que relaciona su módulo de rigidez con su densidad es un indicador de la calidad de la madera para usos específicos. El índice material de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* es diferente en cada especie (Tabla 14, Figura 34).

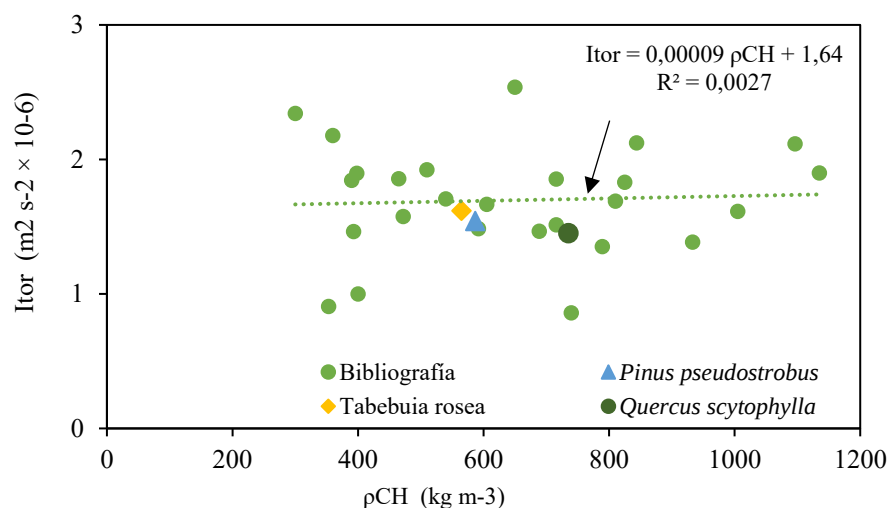


Figura 34. Dispersión del índice material (I_{tor}) en función de la densidad (ρ_{CH}).

Las especies que muestran altos valores del índice material poseen un potencial de calidad para su empleo en la industria de la construcción y en aplicaciones donde las propiedades de resistencia en sollicitaciones y deformaciones fuera de plano son importantes.

Las especies estudiadas se posicionan al interior de la nube de dispersión para maderas reportadas en la bibliografía (Tabla 13 y Figura 34) y son menores comparativamente con otros materiales de uso contractivo como los mostrados en la Figura 35. Es importante hacer notar que estos índices de materiales constructivos son calculados relacionando el módulo de elasticidad en lugar del módulo de rigidez utilizado en la presente investigación. La Figura 35 se presenta sólo para dar una idea del orden de las magnitudes de la madera y otros materiales comerciales.

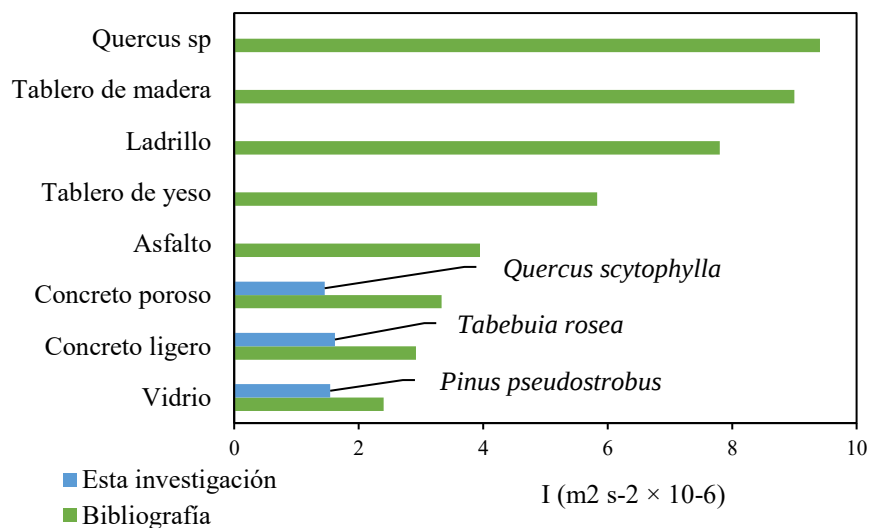


Figura 35. Índices materiales (I_{tor}) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* (esta investigación) y de materiales de construcción (Ashby, 2011).

Los índices materiales determinados en probetas de madera comercial son comparables con datos de especies de densidades parecidas y determinados con experimentos similares a los de la presente investigación (Sotomayor, 2015; Sotomayor 2016; Tabla 13). Respecto a *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla* los índices materiales son similares a los de *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla*. En relación con *Tabebuia rosea*, el índice de *T. rosea* es 29% mayor.

4.6. Módulo de rigidez del multimaterial de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Resumen

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas. Así, la tendencia tecnológica es desarrollar productos compuestos y derivados de madera homogéneos con objeto de reemplazar elementos de madera sólida, cuya variabilidad natural requiere de sobredimensionado para asegurar los requisitos de seguridad y de servicio. El objetivo de la investigación es determinar la densidad y el módulo de rigidez de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*, así como del multimaterial formado con estas especies. Se estudiaron seis unidades experimentales formadas por grupos de probetas de 17 unidades cada uno: tres de madera sólida y tres de multimaterial. Se realizaron pruebas de torsión dinámica y se determinaron los módulos de rigidez. La densidad del multimaterial aumenta comparativamente con la de la madera sólida para las tres especies. El módulo de rigidez del multimaterial aumenta comparativamente con el de la madera sólida. Se encontraron fuertes correlaciones lineales entre las mediciones de la densidad y del módulo de rigidez entre la madera sólida y el multimaterial. El multimaterial madera-adhesivo-malla se prospecta como una mejora tecnológica para su incorporación en la fabricación de productos y elementos estructurales de madera.

Palabras clave: Industria de la construcción, Materiales normalizados, Torsión dinámica, correlaciones lineales, Multimaterial madera-adhesivo-malla

Abstract

The wood construction industry demands standardized materials with well-defined mechanical characteristics. Thus, the technological trend is to develop homogeneous wood composite and derivative products in order to replace solid wood elements, whose natural variability requires oversizing to ensure safety and service requirements. The objective of the research is to determine the density and stiffness modulus of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*

wood, as well as the multimaterial formed with these species. Six experimental units formed by groups of specimens of 17 units each were studied: three of solid wood and three of multimaterial. Dynamic torsion tests were performed and stiffness moduli were determined. The density of the multimaterial increases comparatively with that of solid wood for the three species. The modulus of rigidity of the multimaterial increases comparatively with that of solid wood. Strong linear correlations were found between density and modulus measurements between solid wood and multimaterial. The wood-adhesive-mesh multimaterial is prospected as a technological improvement for its incorporation in the manufacture of products and structural elements of wood.

Key words: Construction industry, Standard materials, Dynamic torsion, Linear correlations, Wood-adhesive-mesh multimaterial

Introducción

Una aplicación de las propiedades de la madera en cortante es en la caracterización de la madera laminada-cruzada (cross-laminated timber, en inglés) (Aicher *et al.*, 2016 review). Así, la determinación del módulo de rigidez de una madera contribuye o indica el uso potencias de la especie para la elaboración de elementos estructurales constituidos de madera de ingeniería.

La industria de la construcción con madera demanda materiales normalizados y con características mecánicas bien definidas (Borgström, 2016). Así, la tendencia tecnológica es desarrollar productos compuestos y derivados de madera homogéneos con objeto de reemplazar elementos de madera sólida, cuya variabilidad natural requiere de sobredimensionado para asegurar los requisitos de seguridad y de servicio (Jacob *et al.*, 2018). De esta manera, al combinar la madera sólida con mallas, tejidos y fibras, y empleando adhesivos adecuados, la madera se transforma en multimaterial que, al combinar las propiedades de sus componentes obtiene una mejora tecnológica para aplicaciones especializadas (Kohl *et al.*, 2017).

El módulo de rigidez de la madera es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes (Cavalli *et al.*, 2017). Por ejemplo, en vigas trabajando en flexión y en torsión, así como en conexiones entre elementos estructurales en edificaciones y en artículos de madera.

Las maderas de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla* son endémicas de México y Centroamérica y son ampliamente empleadas en la industria de la edificación y de productos de madera (Silva *et al.*, 2010). Sus características físicas y tecnológicas mecánicas están divulgadas por (Tamarit y López, 2007). Sus módulos de elasticidad estáticos están reportados por Sotomayor (2019 IMM). Los módulos dinámicos por ultrasonido para madera sólida de *P. pseudostrobus*, madera laminada y multimaterial están notificados por Macedo *et al.* (2019 y 2021).

Información sobre el módulo de rigidez de la madera está publicada para una amplia biodiversidad de especies (Tabla 16). Sin embargo, a la fecha no se detecta información sobre la caracterización en torsión del multimaterial madera-malla-adhesivo empleando las tres especies mencionadas.

Tabla 16. Datos de densidades y módulos de rigidez de la bibliografía.

Especie	ρ_{CH}	G_{LT}	Referencia
	(kg m ⁻³)	(MN m ⁻²)	
<i>Paulownia tomentosa</i>	300	703	Komán y Feher (2017)
<i>Cryptomeria japonica</i>	360	784	Anshari <i>et al.</i> (2011)
<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang <i>et al.</i> (2018)
<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015)
<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz <i>et al.</i> (2014)
<i>Picea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013)
<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015)
<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir <i>et al.</i> (2014)
<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar <i>et al.</i> (2013)
ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez.			

La edificación con madera incorpora madera sólida, tableros aglomerados de fibra, partículas y astillas, así como madera laminada (Jacob *et al.*, 2018). En este contexto, el multimaterial madera-malla-adhesivo se sugiere como un material de ingeniería que puede sustituir piezas de madera funcionando como elementos estructurales y/o arquitecturales. De aquí surge la pregunta de investigación ¿la resistencia mecánica del multimaterial madera-malla-adhesivo es igual a la de la madera sólida con la cual está elaborado?

Para responder a esta cuestión, la hipótesis de la investigación es que la magnitud del módulo de rigidez del multimaterial es mayor que el de la madera sólida. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación es determinar la densidad y el módulo de rigidez de la madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

Materiales y métodos

Materiales

Se prepararon seis grupos de 17 probetas cada uno. Tres de ellos son de madera sólida de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* con dimensiones de 0,01 m × 0,15 m × 0,15 m en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) respectivamente. Los otros tres grupos están formados por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo, las cuales están constituidas por dos placas de madera de las mismas especies, pero con dimensiones de 0,02 m × 0,15 m × 0,15 m (Figura 36). Estas dos placas están unidas ortogonalmente en las direcciones tangencial y longitudinal con una combinación de dos componentes de adhesivo de poliuretano repartidos 200 kg m⁻². Entre las dos placas se posicionó una malla de acero galvanizado en el plano longitudinal-tangencial.

Los tres materiales se consolidaron con presión de 250 kg m⁻² y temperatura de 90 °C durante 1 h (Macedo y Sotomayor, 2021). Así se formaron seis muestras independientes y homogéneas: tres de madera sólida y tres de multimaterial. Los taxones botánicos de las maderas se determinaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

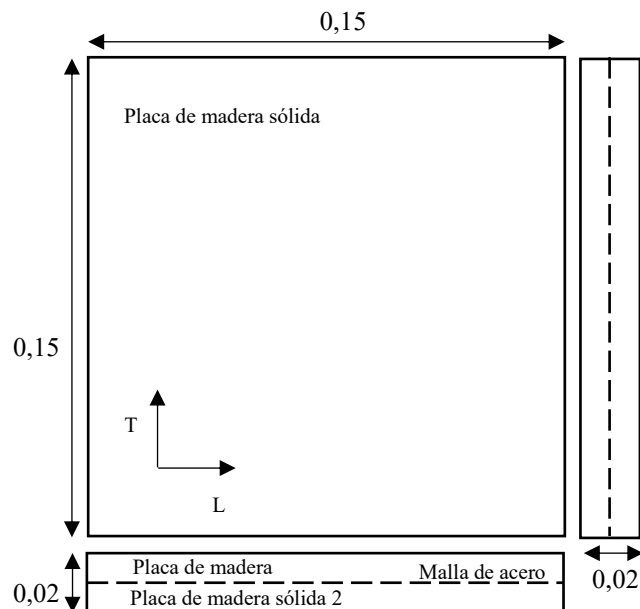


Figura 36. Probeta de multimaterial. T = Dirección tangencial; L = Dirección longitudinal.

Métodos

Las probetas se almacenaron durante seis meses en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y 65 % de humedad relativa del aire hasta que alcanzaron un contenido de humedad en equilibrio de la madera sólida de 10% y el del multimaterial de 11 %. El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad CH, se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14 (American Society for Testing and Materials, 2015a) y siguen el procedimiento descrito en Sotomayor (2016). La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz. La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo que ocasionó

vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma, que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial.

De acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) en cada una de las probetas, se aplicó un impacto empleando una esfera de acero de 0,005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0,01 m de longitud y de 0,002 m de espesor por 0,007 m de ancho. El impacto fue aplicado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0,25 del ancho (b) y a 0,25 del largo (l) de cada espécimen (Figura 37). Empleando un aparato *Grindosonic*® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en el punto (s), en una posición simétrica respecto al punto de impacto.

La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0,005%. El módulo de rigidez es rubricado con el subíndice “LT” para identificarlo como derivado de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

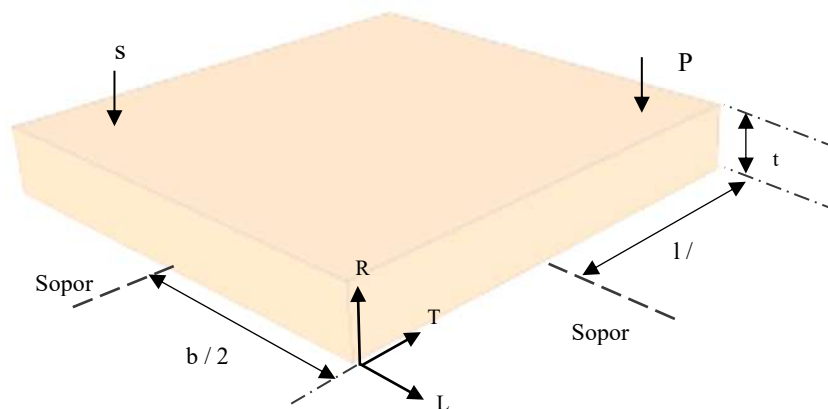


Figura 37. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho).

El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (12) (American Society for Testing and Materials, 2015b):

$$G_{LT} = \frac{4 l m f^2}{b t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (12)$$

con:

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \left(\frac{t}{b} \right) - 2,52 \left(\frac{t}{b} \right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{b} \right)^6}$$

$$A = \frac{0,5062 - 0,8776 \left(\frac{b}{t} \right) + 0,3504 \left(\frac{b}{t} \right)^2 - 0,0078 \left(\frac{b}{t} \right)^3}{12,03 \left(\frac{b}{t} \right) + 9,892 \left(\frac{b}{t} \right)^2}$$

Donde:

G_{LT} = Módulo de rigidez ($N m^{-2}$)

f = Frecuencia natural (Hz)

m = masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m)

t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m)

A y B = Factores de ajuste geométrico

Diseño experimental

Se estudiaron seis unidades experimentales formadas por grupos de probetas de 17 unidades cada uno: tres de madera sólida y tres de multimaterial. La transformación de madera sólida de cada especie en multimaterial se considera el factor de variación. Las variables de respuesta fueron la densidad (ρ_{CH}) y el módulo de rigidez (G_{TL}). Así, se formaron 12 muestras independientes y homogéneas (2 tipos de material: madera sólida y multimaterial por 3 especies: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*; por 2 variables de respuesta). De tal forma, se diseñó un experimento

homogéneo, aleatorio y balanceado.

Para cada muestra se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras calculando el sesgo estandarizado (SE) y el apuntamiento estandarizado (AE) con el criterio de demarcación de aceptar distribuciones uniformes para valores al interior del intervalo $[-2 < SE \text{ y/o } AE < +2]$. Se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza con la hipótesis nula: $H_0: \mu_{MM} = \mu_{ms}$ donde los subíndices MM y ms se refieren a las muestras de multimaterial y de madera sólida respectivamente. Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95%. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$.

Resultados y discusión

Las pruebas de normalidad de la distribución de los resultados indican valores del sesgo y del apuntamiento al interior del intervalo $[-2, +2]$ resultado que sugiere que las mediciones pertenecen a muestras con distribuciones uniformes (Tabla 17). Las pruebas de verificación de varianza en todos los pares de muestras indican valores de $P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$, es decir, no existen diferencias significativas entre la madera sólida (ms) y del multimaterial (MM) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

En cambio, el análisis de varianza demuestra que para para todos los pares de la densidad de madera sólida versus multimaterial, si existen diferencias estadísticamente significativas, pero para los módulos de rigidez el mismo análisis muestra que los valores medios de las muestras contrastadas no son estadísticamente diferentes. Estos resultados permiten comparar los valores medios entre las muestras de la madera sólida versus las del multimaterial para cada uno de las tres especies.

Tabla 17. Resultados pruebas de normalidad y de verificación y análisis de varianza.

	SE	AE	Ver-var	Anova
	[-2, +2]	[-2, +2]	$P_{(\alpha = 0,05)}$	$P_{(\alpha = 0,05)}$
ρ_{CH} MM	-0,761	0,074	0,880#	0,022*
ρ_{CH} ms	-0,708	-0,120	-	-
G_{LT} MM	0,995	0,724	0,756#	0,350#
G_{LT} ms	-0,257	-0,968	-	-
ρ_{CH} MM	0,195	-0,165	0,695#	0,006*
ρ_{CH} ms	0,222	-0,378	-	-
G_{LT} MM	1,336	-0,199	0,678#	0,664#
G_{LT} ms	0,497	-0,820	-	-
ρ_{CH} MM	-1,720	0,183	0,666#	<0,001*
ρ_{CH} ms	-1,678	-0,049	-	-
G_{LT} MM	0,945	1,305	0,836#	0,023*
G_{LT} ms	-0,789	1,290	-	-
SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; MM = Multimaterial; ms Madera sólida; # $P < 0,05$: No existe diferencia significativa; * $P < 0,05$: Existe diferencia significativa.				

El multimaterial está elaborado con madera sólida de un mismo lote de la misma especie. Este hecho se traduce en las fuertes correlaciones entre las mediciones de la densidad y del módulo de rigidez entre la madera sólida y el multimaterial (Figura 3). Para el caso de la madera sólida

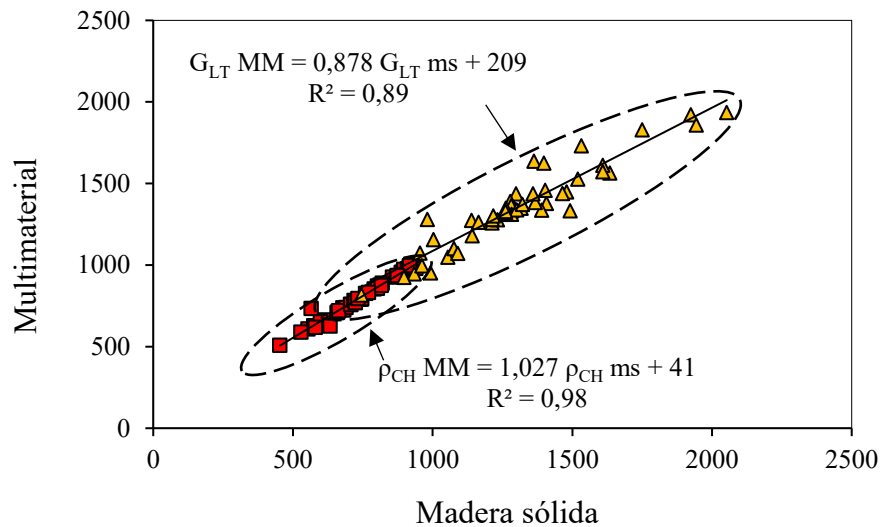


Figura 38. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) y de la densidad (ρ_{CH}) del multimaterial (MM) en función de los mismos parámetros de la madera sólida (ms). Por razones de escala no se visualizan los 51 puntos experimentales de cada parámetro.

Densidad

La densidad del multimaterial aumenta comparativamente con la de la madera sólida para las tres especies (Tabla 18). Este fenómeno se interpreta por la incorporación de la masa de pegamento, que es en promedio de 11 gr por probeta, y del peso de la malla cuyo peso es de 11 gr. De aquí se deriva que su contribución es menor a medida que la densidad de la especie disminuye. Este resultado numérico coincide con las diferencias estadísticas encontradas en el análisis estadístico.

Tabla 18. Resultados pruebas de torsión.

	Madera sólida		Multimaterial		Incremento	
	ρ_{CH}	G_{LT}	ρ_{CH}	G_{LT}	$\Delta\rho_{CH}$	ΔG_{LT}
	(kg m^{-3})	(MN m^{-2})	(kg m^{-3})	(MN m^{-2})	(%)	(%)
	<i>Pinus pseudostrobus</i>					
μ	608	1075	664	1131	+8,43	+5,21
σ	67	177	68	170	-	-

CV	(11,0)	(16,4)	(10,2)	(15,0)	-	-
<i>Tabebuia rosea</i>						
μ	774	1560	835	1593	+7,9	+2,1
σ	58	283	63	206	-	-
CV	(7,4)	(15,3)	(7,5)	(12,9)	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>						
μ	913	1289	980	1347	+7,4	+4,5
σ	20	74	22	66	-	-
CV	(2,2)	(5,7)	(2,3)	(4,9)	-	-
ρ _{CH} = Densidad; G _{LT} = Módulo de rigidez; Δ = Incremento; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.						

Módulo de rigidez

El módulo de rigidez del multimaterial aumenta comparativamente con el de la madera sólida (Tabla 18). Por su parte, las magnitudes del módulo de rigidez de la madera sólida de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son similares a las reportadas para especies con densidades similares (Tabla 18). La densidad es un buen predictor del módulo de rigidez. Así, los valores determinados del multimaterial de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* se sitúan en la tendencia que predice la correlación $G_{LT} = f(\rho_{CH})$ (Figura 39). Es decir, a medida que la densidad aumenta, el módulo de rigidez se incrementa.

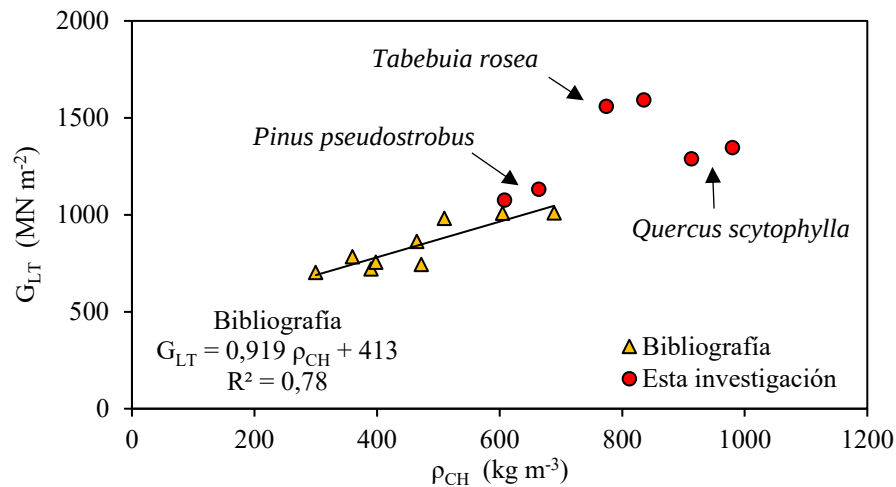


Figura 39. Correlación del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad (ρ_{CH}) con datos de la bibliografía y posicionamiento de los resultados de esta investigación.

El esfuerzo de torsión es afectado principalmente por la capa exterior del sistema en vibración, en el caso del multimaterial, por los dos componentes (placas) de las probetas (Figura 36) (Roohnia y Kohantobari, 2015). En el caso de la madera sólida, son las dos capas cercanas a las superficies de las probetas compuestas por un solo elemento. No obstante, la contribución de la malla situada en el centro de las probetas del multimaterial, puede ser la causa del aumento en su rigidez en torsión comparativamente con la madera sólida.

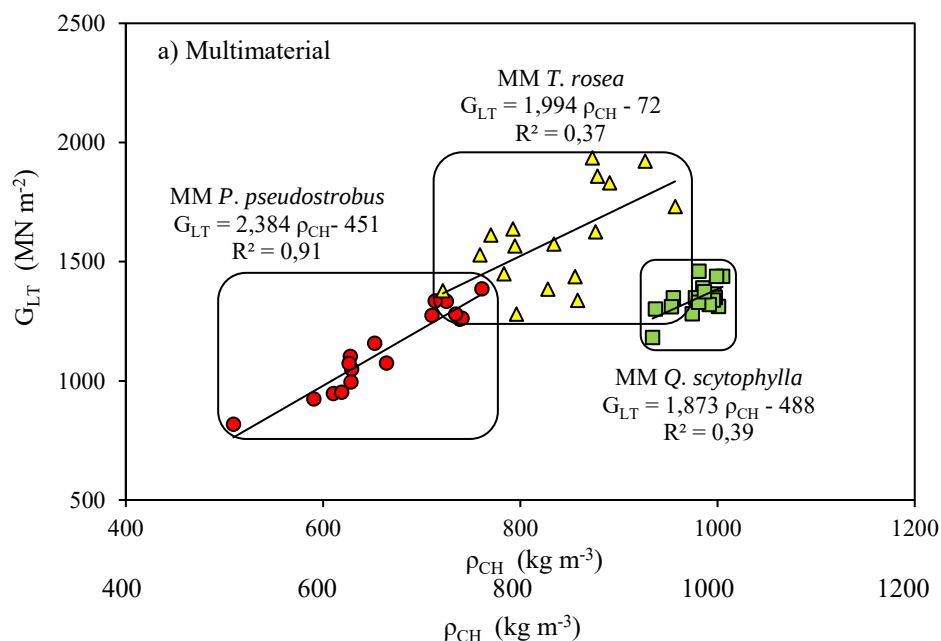


Figura 40. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad (ρ_{CH}) para: a) Multimaterial (MM) y b) Madera sólida (ms).

Las magnitudes de los módulos de rigidez de la madera sólida y del multimaterial de *T. rosea* se posicionan por debajo de los tableros de astillas orientadas (TAO) reportados por Zhuo *et al.* (2017) y por encima de los tableros de densidad media (TDM) del mismo autor y de los tableros multiplacas (TMP) reportados por Merhar (2020) (Figura 41).

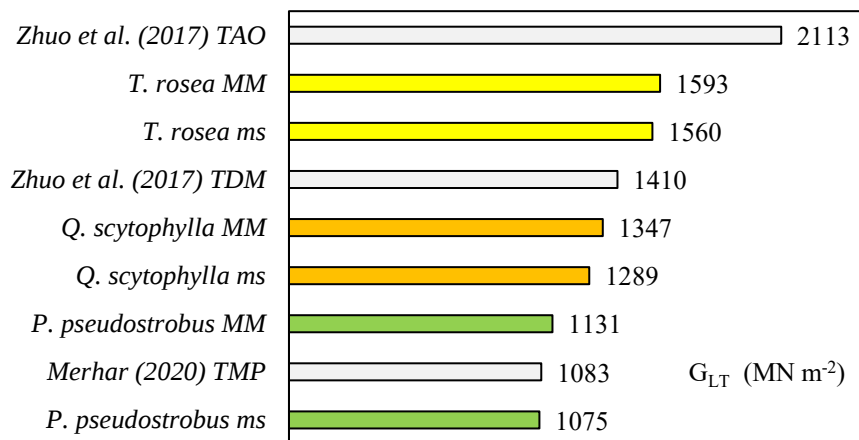


Figura 41. Posicionamiento del módulo de rigidez (G_{LT}) del multimaterial (MM) y de la madera sólida (ms) respecto a tableros de astilla orientada (TAO), tableros de densidad media (TDM) y tableros multiplacas (TMP).

Los datos de *Q. scytophylla* se sitúan por debajo de los tableros de astillas orientadas y de densidad media, pero por encima de los tableros multiplacas (Figura 41). Los resultados de madera sólida de *P. pseudostrobus* se posicionan por debajo de los tres tipos de tableros comparados y los de multimaterial solo por encima de los tableros multiplacas. Estos resultados sugieren que, desde el punto de vista del módulo de rigidez, el multimaterial de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* puede reemplazar a los materiales compuestos referidos.

Las diferencias en magnitudes son atribuibles a la especie (Lahr *et al.*, 2017) y al método de cálculo (Krüger y Wagenführ, 2020) desarrollar

Frecuencias

En las frecuencias del multimaterial, de las tres especies existe una correlación entre cada una de ellas, sin embargo, para el *Pinus pseudostrobus* es mayor con respecto al *Quercus scytophylla* y *Tabebuia rosea*.

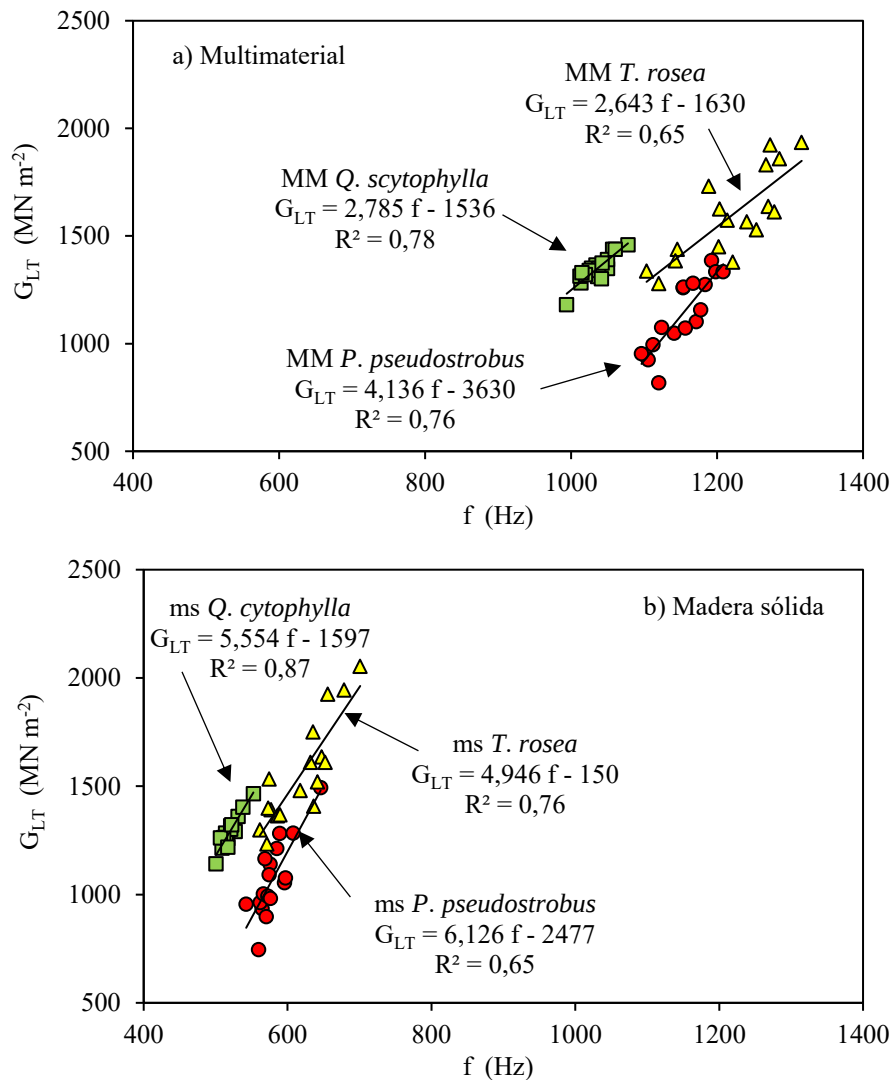


Figura 42. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la frecuencia (ρ_{CH}) para a) Multimaterial (MM) y b) Madera sólida (ms).

4.7. Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo

Resumen

La hipótesis de la investigación propone que la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial constituido con madera-malla-adhesivo. Para verificar esta propuesta, el objetivo de la investigación fue determinar estos tres parámetros en probetas de pequeñas dimensiones de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*. con madera de las mismas especies se prepararon dos grupos de probetas, uno de madera sólida y otro de multimaterial. Se determinó su contenido de humedad y su densidad, también se realizaron mediciones de la velocidad del ultrasonido y se calcularon los módulos dinámicos. Se analizaron los resultados probeta por probeta de una misma especie, su anisotropía y se calcularon las correlaciones estadísticas entre las variables de respuesta. Igualmente, se analizó el efecto de las mallas en los resultados promedio.

La densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida aumentan por la elaboración del multimaterial. en cambio, en el multimaterial, disminuye su variabilidad y anisotropía. La malla y el adhesivo funcionan como componentes estabilizadores en el multimaterial, por lo que en este disminuye la magnitud de la velocidad longitudinal, pero aumenta la tangencial. La densidad no es un buen predictor de la velocidad del ultrasonido. En cambio, es un predictor medio del módulo dinámico.

Palabras clave: anisotropía, contenido de humedad, densidad, módulo dinámico, velocidad del ultrasonido.

Abstract

The research hypothesis proposes that the density, the speed of the ultrasound and the dynamic modulus of solid wood increase as an effect of its transformation into a multimaterial made up of wood-mesh-adhesive. To verify this proposal, the objective of the research was to determine these

three parameters in small specimens of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*. With wood of the same species, two groups of test tubes were prepared, one of solid wood and the other of multimaterial. Its moisture content and density were determined, ultrasound velocity measurements were also made and dynamic moduli were calculated. The results were analyzed specimen by specimen of the same species, its anisotropy and the statistical correlations between the response variables were calculated. Likewise, the effect of the meshes on the average results was analyzed. The density, the speed of the ultrasound and the dynamic modulus of solid wood are increased by the processing of the multimaterial. On the other hand, in the multimaterial, its variability and anisotropy decrease. The mesh and the adhesive function as stabilizing components in the multimaterial, so the magnitude of the longitudinal velocity decreases in it, but the tangential velocity increases. Density is not a good predictor of ultrasound speed. Instead, it is a mean predictor of the dynamic modulus.

Keywords: anisotropy, density, dynamic modulus, moisture content, ultrasound speed.

Introducción

En tecnología de la madera, una propuesta contemporánea es la modificación de sus propiedades intrínsecas aplicando procesos de densificado, plastificado y/o de preservación para optimizar su aprovechamiento industrial (Sandberg, Kutnar y Mantanis, 2017). Este enfoque tiene por objetivo mejorar sus propiedades y reducir su heterogeneidad, higroscopía y tendencia al deterioro. Todas estas son características naturales de la materia prima que se obtienen de una amplia biodiversidad de especies forestales (Ramage *et al.*, 2017).

Una segunda tendencia es el desarrollo de compuestos y de madera de ingeniería con la finalidad de transitar del uso de la madera como materia prima, a su empleo como material de ingeniería (Ormondroyd, Spear y Curling, 2015). Estos materiales tienen características físicas bien definidas y se pueden comercializar en el mercado como productos industriales o insumos normalizados para el cálculo ingenieril y en el diseño arquitectónico, así como en las industrias que requieren que la madera y sus materiales derivados estén caracterizados (Asdrubali *et al.*, 2017). Esta estrategia

permite al ingeniero y arquitecto disponer de un material que puede competir con otros insumos en el mercado (Zmijewski y Wojtowicz-Jankowska, 2017).

En esta investigación se presenta la caracterización mecánica de un multimaterial compuesto de madera sólida, malla y adhesivo. Este multimaterial puede tener aplicaciones como sustituto y/o complemento de elementos estructurales y arquitecturales (Kohl, Long y Böhm, 2017). se elaboró con las maderas *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Tuercus scytophylla*, las cuales son utilizadas en la industria de transformación como materia prima para elaborar madera aserrada y tableros contrachapados y aglomerados de fibra y astilla (Tamarit y López, 2007; Silva *et al.*, 2010). Sin embargo, existe poca información acerca de su transformación en un multimaterial con vocación constructiva.

Macedo, Sotomayor y Castro (2019) y Macedo y Sotomayor (2021) reportan estudios con ultrasonido de multimaterial madera-malla-adhesivo con un acomodo paralelo de sus láminas. los autores citados determinaron densidades, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos para madera sólida, madera laminada y multimaterial de *P. pseudostrobus*. No obstante, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

La hipótesis de la investigación propone que la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial madera-malla-adhesivo. para verificar esta propuesta, el objetivo de la investigación fue determinar estos tres parámetros en probetas de pequeñas dimensiones de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* y de multimaterial elaborado con estas mismas especies.

Metodología

Se prepararon seis grupos de 17 probetas cada uno. tres de ellos son de madera sólida de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* con dimensiones de 0,01 m × 0,15 m × 0,15 m en las direcciones radial (r), tangencial (t) y longitudinal (l), respectivamente (figura 42). Los otros tres grupos están formados por probetas de multimaterial madera-malla-adhesivo, las cuales están

constituidas por dos placas de madera de las mismas especies, con dimensiones de $0,02 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ (figura 43). Estas dos placas están unidas ortogonalmente en las direcciones tangencial y longitudinal con una combinación de dos componentes de adhesivo de poliuretano repartidos 200 kg m^{-2} . Entre las dos placas se posicionó una malla de acero galvanizado en el plano longitudinal-tangencial. Los tres materiales se consolidaron con presión de 250 kg m^{-2} y temperatura de 90°C durante 1 h. Los taxones botánicos de las maderas se determinaron en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

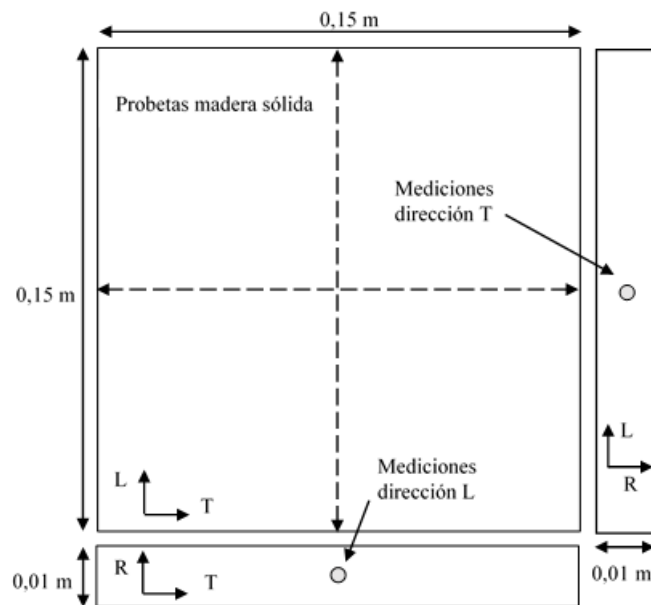


Figura 43. Probeta de madera sólida

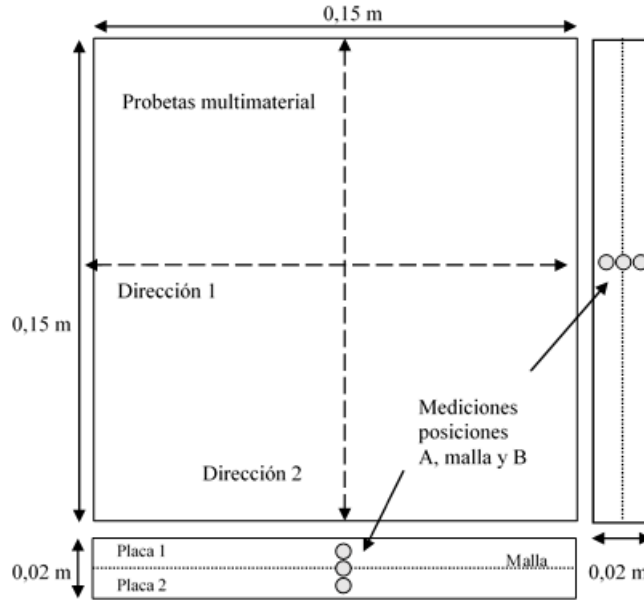


Figura 44. Probeta de multimaterial.

Para cada muestra se determinó su contenido de humedad (ch) (ISO 13061-1:2014, International Organization for Standardization, 2014a), y su densidad (ρ_{ch}) (ISO 13061-2:2014 International Organization for Standardization, 2014b). Se realizaron mediciones de la velocidad del ultrasonido (Sotomayor *et al.*, 2021) en las direcciones tangencial y longitudinal de la madera sólida (figura 44).

Dado que en el multimaterial las direcciones tangencial y longitudinal de la madera se combinan, las velocidades del ultrasonido se midieron en las posiciones a y b de las placas de madera y paralelamente al plano correspondiente a la malla (figura 43). igualmente, se midieron las velocidades del ultrasonido a través de la malla en su dirección paralela al plano principal, a partir de la ecuación de onda (13) (Meyers, 1994):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (13)$$

Donde:

u = Vector desplazamiento

x = Coordenada espacial

t = Coordenada temporal

v = Velocidad de onda

Los módulos dinámicos se calcularon con la ecuación (14) (Dackermann *et al.*, 2016):

$$e_{us} = \rho_{ch} \times v_{us}^2 \quad (14)$$

Donde:

e_{us} = Módulo dinámico (n m^{-2})

ρ_{ch} = Densidad (kg m^{-3})

v_{us} = Velocidad del ultrasonido (m s^{-1})



Figura 45. Pruebas de ultrasonido.

Diseño experimental

Se estudiaron seis unidades experimentales, tres de la madera sólida y tres del multimaterial, y cada unidad se formó por grupos de 17 probetas. La transformación de madera sólida de cada especie en multimaterial se considera el factor de variación. Las variables de respuesta fueron la densidad (ρ_{ch}), la velocidad del ultrasonido (v_{us}) y el módulo dinámico (e_{us}), así, se formaron 18 muestras independientes y homogéneas (2 tipos de material: madera sólida y multimaterial por tres especies: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* por tres variables de respuesta). de tal forma, se diseñó un experimento homogéneo, aleatorio y balanceado.

La estrategia experimental consistió en medir la velocidad del ultrasonido en las posiciones a, malla y b del multimaterial (figura 43). De esta forma se pudo analizar de manera local el efecto de la matriz malla-adhesivo sobre el ultrasonido en las placas de madera. Sin embargo, para observar el efecto integral, se tomaron como valores el promedio de estas tres mediciones.

Para cada muestra se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($cv = \sigma / \mu$). Se realizaron pruebas de normalidad de la distribución de las muestras calculando el sesgo estandarizado (se) y el apuntamiento estandarizado (ae) con el criterio de demarcación de aceptar distribuciones uniformes para valores al interior del intervalo $[-2 < se \text{ y/o } ae < +2]$.

Para los datos de las velocidades del ultrasonido, se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza y de grupos homogéneos con la hipótesis nula: $h_0: \mu_1 = \mu_2$ donde los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras en contrastación. las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95%. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $p_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Para observar el efecto del tratamiento en cada una de las placas que forman el multimaterial, se realizaron las mismas pruebas anteriores, pero para las mediciones correspondientes a las direcciones 1 y 2 (figura 43).

Para verificar la suficiencia en el número de probetas observadas en cada grupo, se calculó el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas para un error aceptable del 0,05. Este análisis se realizó para la densidad y la velocidad del ultrasonido por considerarlas mediciones directas. El número de probetas se calculó con la ecuación (15) (Gutiérrez y de la Vara, 2012):

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (15)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05).

Resultados

Tamaño de la muestra

Los tamaños de muestra calculados necesarios para considerar muestras representativas de la densidad y la velocidad del ultrasonido son iguales y/o menores que las 17 probetas observadas para la madera sólida y el multimaterial para las tres maderas (tabla 19). Circunstancia diferente es la madera sólida de *P. pseudostrobus*, en cuyo caso el número necesario de probetas es mayor a la cantidad de probetas observadas. si no se considera la excepción de *P. pseudostrobus*, estos resultados indican que la cantidad de mediciones realizadas son representativas de la población, pero son diferentes para cada especie y tipo de material observado. para *P. pseudostrobus* y *T. rosea* los tamaños de muestra necesarios para el multimaterial disminuyen considerablemente con relación a los de la madera sólida. en cambio, para *Q. scytophylla* aumentan.

Tabla 19. Tamaño de la muestra.

	Madera sólida		Multimaterial	
Especie	ρ_{ch}	V_{us}	ρ_{ch}	V_{us}
	n	n	n	n
<i>Pinus pseudostrobus</i>	44	21	17	3
<i>Tabebuia rosea</i>	17	9	6	5
<i>Quercus scytophylla</i>	1	1	4	4
ρ_{ch} = Densidad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; n = Tamaño de la muestra.				

Verificación estadística de las muestras las pruebas de normalidad para las mediciones del ultrasonido en las direcciones 1 y 2 verifican la distribución normal de las muestras de las tres especies. en el mismo contexto, la verificación de la varianza y su análisis indican que no existen diferencias estadísticamente significativas (tabla 20). Con excepción de *P. pseudostrobus*, el análisis anova indica que no hay diferencias significativas y como consecuencia sus grupos son homogéneos.

Tabla 20. Resultados análisis estadístico de las velocidades del ultrasonido.

	se	ae	ver-var	anova	gh	gh
	[-2, +2]	[-2, +2]	P ($\alpha = 0,05$)	P ($\alpha = 0,05$)		
	<i>Pinus pseudostrobus</i>					
Multimaterial dirección 1	0,5234	-0,3016	0,7755*	0,0994*	x	
Multimaterial dirección 2	-0,1898	-0,6803	-	-	x	
Madera sólida	-1,4550	-0,1495	0,0856*	< 0,001 [#]	x	
Multimaterial integral	1,2800	0,4418	-	-		x
	<i>Tabebuia rosea</i>					
Multimaterial dirección 1	0,2241	-0,5079	0,5857*	0,0411 [#]	x	

Multimaterial dirección 2	0,8579	-0,1984	-	-	x	
Madera sólida	0,2474	-0,1370	0,5541*	< 0,001 [#]	x	
Multimaterial integral	0,6223	-0,4231	-	-		x
<i>Quercus scytophylla</i>						
Multimaterial dirección 1	-0,4777	-0,1838	0,6548*	0,0015 [#]	x	
Multimaterial dirección 2	0,9863	0,2690	-	-	x	
Madera sólida	0,5258	-0,8022	0,4351*	< 0,001 [#]	x	
Multimaterial integral	-0,5568	-0,4551	-	-		x
SE = Sesgo estandarizado; ae = Apuntamiento estandarizado; ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; gh = Grupos homogéneos; * $p_{(\alpha=0,05)} > 0,05$ = No existe diferencia significativa; # $p_{(\alpha=0,05)} < 0,05$ = Existe diferencia significativa.						

Como corolario, la prueba de grupos homogéneos no distingue las medidas entre las direcciones 1 y 2, las cuales corresponden a las direcciones tangencial y longitudinal de la madera de las placas, e indica que las propiedades de anisotropía de la madera se equilibran. debido a este efecto, el multimaterial se puede considerar un material isotrópico en el plano tangencial-longitudinal y en su plano espejo longitudinal-tangencial. esto significa una mejora tecnológica si los requisitos de diseño demandan un material con características invariantes en función de la dirección de observación, es decir, un material isotrópico.

Para las tres especies, las velocidades medidas en la madera sólida, comparadas con las del multimaterial, los valores del sesgo y del apuntamiento estandarizado refieren distribuciones normales (tabla 20). Asimismo, la verificación de la varianza señala que no existen diferencias estadísticamente significativas, resultado que sugiere repetividad en las magnitudes de las mediciones. en cambio, el análisis de varianza muestra que para cada uno de estos pares de muestras existen diferencias estadísticas, lo que se traduce en la diferenciación de sus grupos homogéneos.

Estos resultados indican que la transformación de madera sólida en multimaterial modifica las velocidades del ultrasonido, lo que denota que el multimaterial posee propiedades acústicas diferenciadas de la madera con la que está fabricado. esta modificación es útil para diseñar elementos funcionales donde las propiedades acústicas son específicas para una madera, pero diferentes para sus derivados.

Densidad

Las magnitudes de las densidades de las maderas sólidas (tabla 21) son del mismo orden que las reportadas por Tamarit y López (2007) y Silva *et al.* (2010) para estas maderas. dada la novedad del multimaterial, sus densidades no pueden ser comparadas con datos de la bibliografía. La densidad de la madera sólida es un predictor medio de la densidad del multimaterial (figura 45), posiblemente, porque durante su elaboración la distribución del adhesivo no fue uniforme. En la figura 45 y en las subsecuentes por motivos de escala no se observan todos los puntos experimentales. la densidad del multimaterial elaborado con *P. pseudostrobus* aumenta 9,2% respecto a la de la madera sólida; la de *T. rosea* aumenta 7,8% y la de *Q. scytophylla* se incrementa 7,9%. dado que el peso de la malla es el mismo y se puede considerar similar en las probetas, estos incrementos se explican por la masa de la malla y del adhesivo presente en el multimaterial. en el mismo orden, los coeficientes de variación disminuyen 38,3%, 26,2% y 21,1%.

Tabla 21. Resultados de densidad y pruebas de ultrasonido.

	ρ_{ch}	V_{us}	e_{us}
	(kg m ⁻³)	(m s ⁻¹)	(mn m ⁻²)
<i>Pinus pseudostrobus</i>			
	Madera sólida		
μ	608	3232	6325
σ	101	368	1368
cv	(16,6)	(11,4)	(21,6)

	Multimaterial		
μ	664	4402	12865
σ	68	189	1590
cv	(10,2)	(4,3)	(12,4)
<i>Tabebuia rosea</i>			
	Madera sólida		
μ	775	3076	7358
σ	79	182	1180
cv	(10,2)	(5,9)	(16,0)
	Multimaterial		
μ	835	3913	12817
σ	63	218	1738
cv	(7,5)	(5,6)	(13,6)
<i>Quercus scytophylla</i>			
	Madera sólida		
μ	908	3188	9247
σ	26	161	974
cv	(2,9)	(5,1)	(10,5)
	Multimaterial		
μ	980	4346	9247
σ	22	205	974
cv	(2,3)	(4,7)	(10,5)
ρ_{ch} = Densidad; v_{us} = Velocidad del ultrasonido; e_{us} = Módulo dinámico; μ = Media; σ = Desviación estándar; cv = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.			

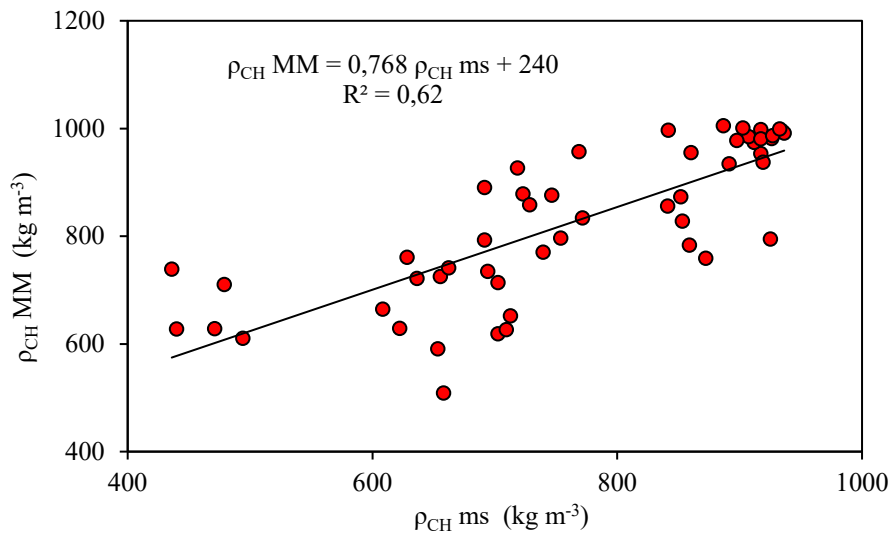


Figura 46. Correlación de la densidad del multimaterial ($\rho_{ch\ mm}$) en función de la densidad de la madera sólida ($\rho_{ch\ ms}$) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

Esta disminución en la variabilidad natural de la densidad de la madera representa una mejora tecnológica y propone al multimaterial como una madera de ingeniería con aplicaciones para la industria de la construcción donde el diseño y cálculo ingenieril requieren materiales homogéneos y caracterizados a partir de resultados de laboratorio.

Velocidad del ultrasonido

Las magnitudes de las velocidades del ultrasonido de las maderas sólidas (tabla 21) son del mismo orden que las reportadas para estas especies por Sotomayor, Macedo y Chávez (2020). Dada la novedad del multimaterial, sus velocidades del ultrasonido no pueden ser comparadas con datos de la bibliografía. los resultados indican que las densidades no son buenos predictores de las velocidades del ultrasonido (figura 46).

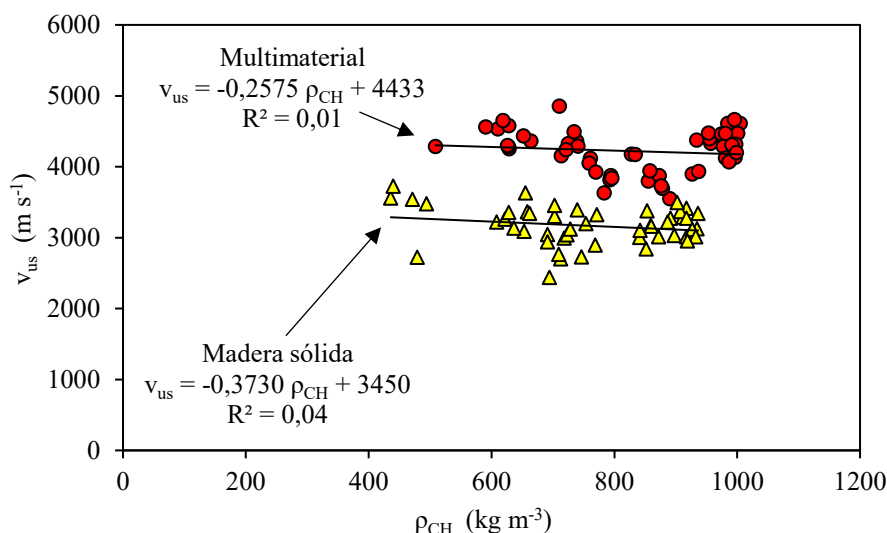


Figura 47. Correlaciones de las velocidades del ultrasonido (v_{us}) en función de las densidades (ρ_{ch}) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

Sin embargo, se observan dos nubes de datos bien diferenciados para la madera sólida y para el multimaterial de las tres especies. la velocidad del ultrasonido del multimaterial elaborado con *p. pseudostrobus* aumenta 32,6% respecto a la de la madera solida; la de *t. rosea* aumenta 27,2% y la de *q. scytophylla* se incrementa 36,3% (tabla 21). es decir, la densidad y la velocidad del ultrasonido de la madera sólida se incrementan como efecto de su transformación en un multimaterial madera-malla-adhesivo.

En el mismo orden de ideas, los coeficientes de variación de las velocidades del multimaterial disminuyen 62,4%, 5,6% y 6,9% respecto a los de la madera sólida de las tres especies (tabla 21). estos resultados sugieren que la variabilidad natural de la madera disminuye como efecto de la elaboración del multimaterial, lo que se traduce en una mejora tecnológica.

Como consecuencia del acomodo ortogonal de las dos placas, la velocidad del ultrasonido medido, en las direcciones longitudinal y tangencial del multimaterial, se equilibra al rotar las probetas. en la figura 43 se presentan las mediciones de las placas 1 y 2 y de la malla situada entre ellas. en la figura 47 se presentan los promedios de las mediciones del ultrasonido realizadas en las posiciones a y b en cada una de las placas 1 y 2 de *q. scytophylla*. las velocidades en la parte superior de las

figuras corresponden a las direcciones longitudinales de las placas y de la malla. en su caso, las velocidades en la parte inferior se refieren a las direcciones tangenciales. esos resultados fueron similares a los de *p. pseudostrobus* y *t. rosea*, corolarios que sugieren que este efecto es independiente de la especie y permite homogeneizar las magnitudes de las velocidades del ultrasonido en el multimaterial.

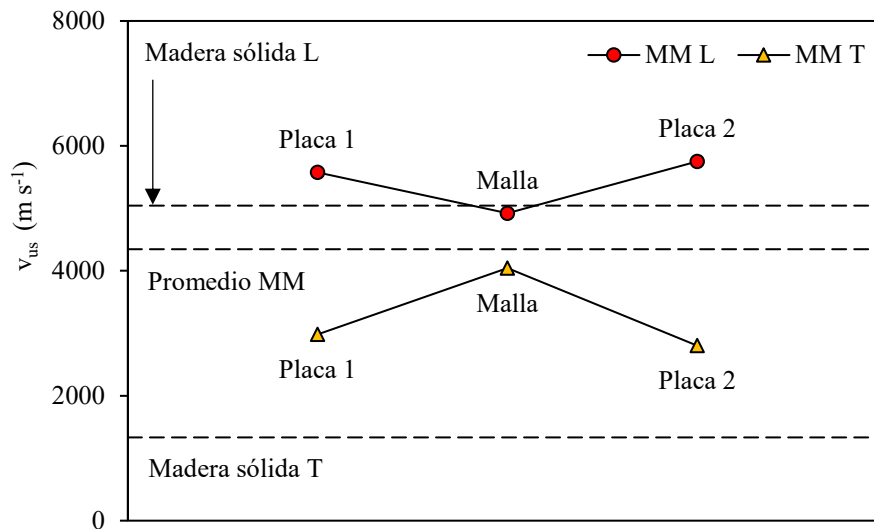


Figura 48. Velocidad del ultrasonido en *Q. scytophylla*. MM = multimaterial; t = dirección tangencial; l = dirección longitudinal.

Así, en la figura 47, las mediciones de la parte superior son mayores pero próximas al promedio de las velocidades de la madera sólida en la dirección longitudinal y la velocidad del ultrasonido a través de la malla es menor, lo que hace que disminuyan los valores promedio (tabla 21). a manera de un efecto de espejo, las velocidades en la parte inferior son mayores al promedio de las del ultrasonido de la dirección tangencial de la madera sólida (figura 47). en este caso las mediciones en la malla son mayores que las de las placas.

Las diferencias entre especies y entre probetas son ocasionadas por la variabilidad natural de los caracteres anatómicos de la madera, como son el porcentaje de madera tardía presente en una capa de crecimiento anual, la desviación local de la fibra y el ángulo de los anillos de crecimiento de la sección transversal a la dirección del ultrasonido (Manzo, Tippner y Zatloukal, 2021).

Las relaciones de anisotropía de la velocidad del ultrasonido entre las direcciones longitudinal y radial son para *P. pseudostrobus* 4,2; para *T. rosea* 3,2 y para *Q. scytophylla* 3,8; estos parámetros disminuyen respectivamente a 1,04, 1,05 y 1,07, lo que significa una disminución promedio de 72%. este fenómeno se puede observar en la figura 48 correspondiente a *t. rosea*.

El valor promedio de la madera sólida en la dirección longitudinal es mayor que el correspondiente al multimaterial, el cual a la vez es mayor que el de la dirección radial. esos resultados fueron similares a los de *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla*. así, el multimaterial equilibra las diferencias entre las velocidades longitudinal y tangencial de la madera sólida y se prospecta como un material menos variable y más homogéneo en lo que respecta a su capacidad para transmitir una onda mecánica, en este caso, de ultrasonido.

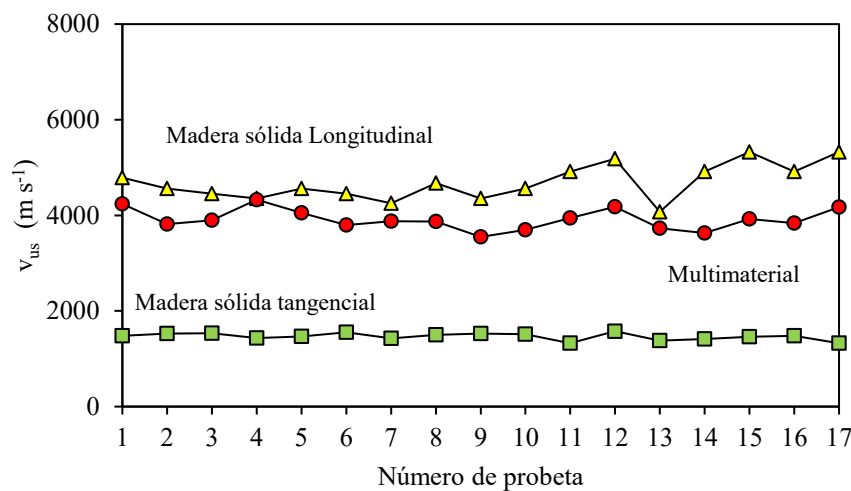


Figura 49. Velocidad del ultrasonido (v_{us}) para *T. rosea*.

Como resultado, las velocidades promedio del multimaterial son mayores que las de la dirección tangencial de la madera sólida pero menores a las correspondientes a la dirección longitudinal (Baradit, Fuentealba y Yáñez, 2021). Dado que las relaciones de anisotropía indican la preponderancia de la velocidad en la dirección longitudinal, respecto a la tangencial, este análisis explica el aumento aparente de la velocidad del ultrasonido en el multimaterial respecto a la madera sólida. Estos resultados indican una ganancia tecnológica ya que el multimaterial equilibra la transmisión del ultrasonido, reduce la anisotropía propia de la madera sólida y aumenta la

capacidad de transmisión del ultrasonido en las direcciones ortogonales que forman el plano longitudinal-tangencial. este fenómeno ha sido reportado por Macedo, Sotomayor y Castro (2019) para multimaterial de *P. pseudostrobus* y sus efectos en el módulo dinámico.

Módulo dinámico

Las magnitudes de módulos dinámicos de las maderas sólidas (tabla 21) son del mismo orden que las reportadas por Sotomayor (2019) para estas maderas. Dada la novedad del multimaterial, sus módulos dinámicos no pueden ser comparados con datos de la bibliografía. as densidades son predictores medios de los módulos dinámicos (figura 49). Sin embargo, sus coeficientes de determinación r^2 son similares. este análisis integra el incremento en las magnitudes de la densidad y la velocidad del ultrasonido (fórmula 14), así como la disminución de la variabilidad representada por los coeficientes de variación (tabla 21).

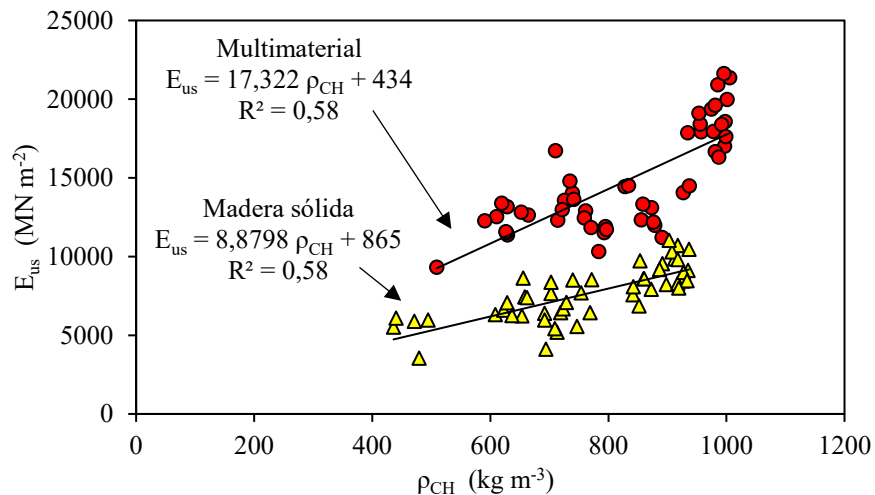


Figura 50. Correlaciones de los módulos dinámicos (e_{us}) en función de las densidades (ρ_{ch}) de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*.

El módulo dinámico del multimaterial elaborado con *P. pseudostrobus* aumenta 103,4% respecto al de la madera solida; el de *T. rosea* aumenta 74,2% y el de *Q. scytophylla* se incrementa 100,6%. en el mismo orden, los coeficientes de variación disminuyen 42,9%, 15,4% y 4,1%. de tal manera

que el multimaterial mejora la resistencia de la madera con la cual está elaborado y al mismo tiempo disminuye su variabilidad. así, estos parámetros representan los valores promedio de las mediciones realizadas y, con los ajustes requeridos por la normatividad, pueden ser utilizados, para fines prácticos, por el ingeniero y arquitecto que requieren valores para calculo y diseño de edificación y reparación de estructuras de madera (Jaskowska-Lemańska y Przesmycka, 2021).

4.8. Vibraciones transversales para determinar en multimaterial madera-malla-adhesivo su módulo dinámico e índice material

Resumen

Objetivo: Determinar la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico e índice de calidad en una muestra estadísticamente representativa de probetas de *Fagus crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie.

Método: Se realizaron pruebas de vibraciones transversales en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y se determinaron su contenido de humedad, densidades, frecuencias, módulos dinámicos e índices de calidad.

Resultados: La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico. La frecuencia es un buen predictor del módulo dinámico. La densidad del multimaterial aumenta respecto a la de la madera sólida.

Limitaciones: Los resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de la madera de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo y son válidos para las condiciones particulares de la metodología empleada en esta investigación.

Principales hallazgos: La transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, disminuye la variabilidad natural de la madera de *F. crenata*.

Palabras clave: contenido de humedad, densidad, frecuencia, *Fagus crenata*.

Abstract

Objective: To determine the density, the frequency, dynamic module and material index in a statistically representative sample of specimens of small dimensions of *Fagus crenata* and to contrast them with the same parameters, but determined in specimens of the multimaterial made with the same species.

Methodology: Transverse vibration tests were carried out on small specimens of *F. crenata* and their moisture content, densities, frequencies, dynamic modules and quality indices were determined.

Results: Density is not a good predictor of dynamic modulus. Frequency is a good predictor of dynamic modulus. The density of the multimaterial increases with respect to that of solid wood.

Limitations: The results are restricted by the experimentation of homogeneous and statistically representative samples of the *F. crenata* wood and the wood-mesh-adhesive multimaterial and are valid for the particular conditions of the methodology used in this research.

Findings: The transformation of solid wood into a wood-mesh-adhesive multimaterial increases its dynamic modulus and its material index. In addition, the natural variability of the *F. crenata* wood decreases.

Keywords: moisture content, density, frequency, *Fagus crenata*

Introducción

Las piezas de madera con aplicaciones comerciales tienen dimensiones y formas limitadas por la geometría del árbol y cuentan con una estructura anatómica porosa y ordenada en capas de crecimiento alrededor del eje principal del árbol (Richter, 2015; Ramage *et al.*, 2017). Como resultado, la madera es heterogénea, higroscópica, anisotrópica y biodegradable. Estas propiedades limitan su empleo como material de arquitectura e ingeniería y condicionan el aprovechamiento

racional de especies maderables con características mecánicas que no satisfacen los criterios de diseño estipulados en la normatividad (Jacob, Harrington y Robinson, 2018). Para competir con otras materias primas, la madera como insumo y/o producto industrial debe ser un material lo más homogéneo e isotrópico posible, resistente a la humedad y al deterioro, así como garantizar la precisión en sus parámetros mecánicos (American Institute of Timber Construction, 2012; Borgström, 2016a; Borgström, 2016b; Borgström, 2016c).

Estos argumentos implican la caracterización de la madera especie por especie y está sujeta a las condiciones de ensayo, así como reportar datos derivados de un tamaño de muestra estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar (Sotomayor y Correa, 2016; Fink *et al.*, 2018).

Para transitar de la percepción de la madera como una materia prima hacia su apreciación como un material de ingeniería, se han desarrollado tres vertientes tecnológicas. La primera es la modificación de la madera sólida empleando técnicas de secado, protección, densificado, plastificado, así como tratamientos térmicos (Sandberg, Haller y Navi, 2013; Ormondroyd, Spear y Curling, 2015; Song *et al.*, 2017; Hill, 2006; Sandberg, Kutnar y Mantanis, 2017). De esta manera, se mejoran sus características tecnológicas naturales y se amplía el uso potencial de especies de baja apreciación en el mercado.

La segunda orientación es la elaboración de materiales compuestos de madera que reconstituyen la geometría y la estructura natural de la madera a partir de fibras y/o astillas (Niederwestberg, Zhou y Chui, 2018), placas (Jorda *et al.*, 2020) y láminas (Icimoto *et al.*, 2016; Corigliano *et al.*, 2017), las cuales son combinadas con nanomateriales (Merk *et al.*, 2014; Marzi, 2015), resinas (Wei *et al.*, 2019), plásticos reforzados (Raftery y Rodd, 2015), polímeros reforzados con fibra de carbono (Borri, Corradi y Grazini, 2005; Corradi, Righetti y Borri, 2015; Reis *et al.*, 2018), concreto (Byeon *et al.*, 2016; De Lima, Iwakiri y Trianoski, 2020) y/o resinas (Clauß *et al.*, 2011; Gáborik *et al.*, 2016). Estas tecnologías aumentan las propiedades de resistencia mecánica y de servicio de la madera y sus derivados.

El tercer enfoque es reforzar piezas de madera sólida y/o laminada con metales (Jasieńko y Nowak, 2014; Cañola, Echavarría y Echavarría, 2018), cementos (Jorge, Pereira y Ferreira, 2004; Na *et al.*, 2014), fibras naturales (Saba *et al.*, 2016) y/o sintéticas (Qi *et al.*, 2015; Nadir *et al.*, 2016; Kusnindar *et al.*, 2018), y consolidarlos con resinas y/o adhesivos (Stoeckel, Konnerth y Gindl-Altmutter, 2013; Gáborik *et al.*, 2016) y/o componentes mecánicos (Campilho *et al.*, 2010; Dietsch y Brandner, 2015; Steiger *et al.*, 2015; Rangavar, 2017; Togay *et al.*, 2017; Karampour *et al.*, 2018; Qiao, Yang y Mou, 2020). Así, al combinar las propiedades físico-mecánicas de cada componente, se logra incrementar su resistencia mecánica y, al incorporar sustancias protectoras, decrece su biodeterioro y se mejora su estabilización dimensional. Como corolario, existen amplias posibilidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que tienen propiedades similares a la madera sin disminución de sus propiedades estéticas, ambientales y sustentables (Milner, 2009; Asdrubali *et al.*, 2017; Caruso *et al.*, 2017).

Los parámetros técnicos de la madera están especificados para una especie y se le asocia una densidad, un contenido de humedad y una dirección de anisotropía. Igualmente, cada parámetro se tabula acompañado de un valor medio, su desviación estándar y un coeficiente de variación. De tal forma que el ingeniero y el arquitecto pueden calcular y diseñar proyectos con geometrías y formas que diversifican el uso de la madera aserrada transformándola en material de ingeniería (Li, Natsuki y Ni, 2014; Kohl, Link y Böhm, 2016; Khol, Long, y Böhm, 2017; Khol *et al.*, 2018) y arquitectura (Nadir *et al.*, 2016; Żmijewski y Wojtowicz-Jankowska, 2017; Papadopoulos, 2020a; Papadopoulos, 2020b).

Las características requeridas por la normatividad para el uso de materiales de madera son determinadas con tres perspectivas. La primera son las normas para piezas de madera con dimensiones de empleo (ANSI 405-2018; ANSI 117-2020); la segunda perspectiva es el estudio de probetas de pequeñas dimensiones con procedimientos igualmente normalizados (ISO 16978:2003; ISO 13061-4:2014); el tercer enfoque es la experimentación con protocolos especiales para cada caso de estudio (Kielmann Miltitz y Mai, 2013; Faydi *et al.*, 2017). Por otra parte, esta caracterización mecánica se realiza en condiciones de carga estática (Bardak, 2019; Wang *et al.*, 2019) y/o dinámica (Guan *et al.*, 2016; Dackermann *et al.*, 2016; De Cicco y Taheri, 2018). Es en esta segunda modalidad que los métodos no destructivos encuentran aplicación.

Las vibraciones mecánicas permiten medir la frecuencia natural de una probeta de madera. A partir de la frecuencia, de su masa y de su geometría, se puede determinar el módulo dinámico sin modificar la estructura física de una pieza de madera (Illic 2003; Alfredsen y Larnøy, 2006; Ghosh, Militz y Mai, 2008; Baar, Tippner y Gryc, 2016; Faydi *et al.*, 2017). Este parámetro es necesario en el cálculo ingenieril y en el diseño arquitectural. Igualmente, se utiliza para la clasificación mecánica entre especies. Sin embargo, el módulo dinámico no puede por sí solo posicionar a una especie de madera como un material idóneo para una función estructural y/o de servicio. Así, se hace necesario introducir el índice material de la madera (Ashby, 2011; Král *et al.*, 2015; Dias y De Alvarez, 2017). Este parámetro permite ponderar el módulo dinámico por la densidad y de esta forma homogeneizar el indicador como criterio de diseño.

Otro enfoque para el estudio de las características mecánicas de la madera y los compuestos de madera es el método del elemento finito (Konopka, Gebhardt, y Kaliske, 2017; Darzi *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2018) y sus aplicaciones en la manufactura de compuestos de madera (Singh *et al.*, 2021). Esta visión prospecta un gran potencial para el diseño estructural informatizado, así como para las propuestas de madera flexible (Song *et al.*, 2017) y súper material (Song *et al.*, 2018).

Los módulos de elasticidad determinados en condiciones estáticas de *Fagus crenata* Blume divulgados en la bibliografía son: $E_R = 882 \text{ MN m}^{-2}$, $E_T = 588 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_L = 11760 \text{ MN m}^{-2}$; los módulos de rigidez son: $G_{LR} = 980 \text{ MN m}^{-2}$, $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$ y $G_{RT} = 196 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 740 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 8 % (Naruse, 2003). Los módulos dinámicos por ultrasonido (us) son: $E_{us R} = 2644 \text{ MN m}^{-2}$, $E_{us T} = 1949 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_{us L} = 13992 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 629 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 11 % (Sotomayor *et al.*, 2020). Los subíndices indican la dirección radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) de la madera. No se detectó información acerca del módulo dinámico determinado por vibraciones transversales. Igualmente, y dada la novedad en la configuración del multimaterial madera-malla-adhesivo, no se localizó información sobre su caracterización para la especie en estudio.

Información técnica sobre multimateriales a base de madera está documentada en Li, Natsuki y Ni (2015), Kohl *et al.* (2017) y Macedo *et al.* (2019). La caracterización de adhesivos a base de poliuretano y su interacción con madera sólida y con compuestos de madera están reportados en la

bibliografía (Clauß *et al.*, 2011; Gáborik *et al.*, 2016; Yelle y Stirgus, 2016; Pizzi *et al.*, 2020).

Un resumen de la revisión bibliográfica de la densidad, módulo dinámico e índice material de maderas mexicanas se presenta en la Tabla 22 con datos de Sotomayor (2019).

Tabla 22. Densidad, módulo dinámico e índice material de maderas mexicanas

No.	Especie	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	E_{vt} (MN m ⁻²)	I_{vt} (m ² s ⁻²)
1	<i>Abies religiosa</i>	462	7178	15,5
2	<i>Acacia farnesiana</i>	901	13965	15,5
3	<i>Acosmium panamense</i>	1005	16045	16,0
4	<i>Albizia plurijuga</i>	844	13993	16,6
5	<i>Alnus acuminata</i>	541	11436	21,1
6	<i>Andira inermis</i>	658	8843	13,4
7	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	13681	16,6
8	<i>Cedrela odorata</i>	529	8051	15,2
9	<i>Cordia elaeagnoides</i>	878	13536	15,4
10	<i>Cupressus lindleyi</i>	486	8034	16,5
11	<i>Dalbergia granadillo</i>	1147	20236	17,6
12	<i>Dalbergia paloescrito</i>	833	11569	13,9
13	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	467	6224	13,3
14	<i>Fagus mexicana</i>	642	10178	15,9
15	<i>Fraxinus americana</i>	631	10901	17,3
16	<i>Fraxinus uhdei</i>	603	10250	17,0
17	<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	8765	12,0
18	<i>Gyrocarpus americanus</i>	395	5340	13,5
19	<i>Juglans pyriformis</i>	728	12187	16,7
20	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	893	13269	14,9
21	<i>Pinus douglasiana</i>	538	13828	25,7
22	<i>Pinus pseudostrobus</i>	516	14120	27,4
23	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	14077	16,3

24	<i>Psidium sartorianum</i>	789	8906	11,3
25	<i>Quercus scytophylla</i>	852	13922	16,3
26	<i>Quercus</i> spp.	791	14972	18,9
27	<i>Spathodea campanulata</i>	344	3133	9,1
28	<i>Swietenia humilis</i>	757	9098	12,0
29	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	8548	16,1
30	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	17131	15,6
31	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	8342	13,9
32	<i>Tabebuia rosea</i>	621	10660	17,2
33	<i>Tilia mexicana</i>	442	8610	19,5
ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$.				

Fuente: Sotomayor (2019).

La hipótesis de la investigación propone que la transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo aumenta su módulo dinámico y su índice material. Para verificar esta hipótesis el objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la frecuencia y los dos parámetros referidos en una muestra estadísticamente representativa de probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie.

En la sección materiales y métodos se indica la información de las especies y probetas, así como el diseño experimental; en la sección resultados y discusión se presenta el tamaño de la muestra y la discusión sobre los resultados de las densidades, frecuencias, módulos dinámicos e índices materiales; finalmente, se exponen las conclusiones, limitaciones y hallazgos. La investigación se fundamenta en la teoría de la resistencia de materiales y en la teoría de vibraciones. Además, la proposición se concreta a su comportamiento en sollicitaciones de flexión dinámica en vibraciones transversales sobre apoyos simples, en condiciones de invariabilidad térmica y sin variación espacial del contenido de humedad en las probetas de la madera.

Materiales y métodos

Se prepararon dos grupos de probetas a partir de un mismo lote de madera de la especie *F. crenata*. El primer grupo consistió en 36 probetas de madera sólida con dimensiones de $0,01\text{ m} \times 0,03\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ orientadas en las direcciones radial (espesor), tangencial (ancho) y longitudinal (largo) respectivamente. La madera no contenía defectos de crecimiento. Para el segundo grupo se elaboraron 36 probetas de multimaterial compuesto de dos elementos de madera acomodados ortogonalmente, más una malla de acero con espesor de $0,92\text{ mm}$ localizada entre las dos maderas. Los tres componentes son ensamblados con un adhesivo de poliuretano aplicando presión y temperatura hasta que se consolida el multimaterial. Las dimensiones del multimaterial fueron: espesor $0,02\text{ m}$ (dos piezas de madera sólida de $0,01\text{ m}$), ancho $0,03\text{ m}$ y largo $0,15\text{ m}$. El espesor y el ancho coinciden con las direcciones radial y tangencial. Los dos componentes de madera están colocados con una rotación de 90° respecto a la dirección longitudinal, lo que resulta en un laminado de dos capas cruzadas perpendicularmente (Figura 50).

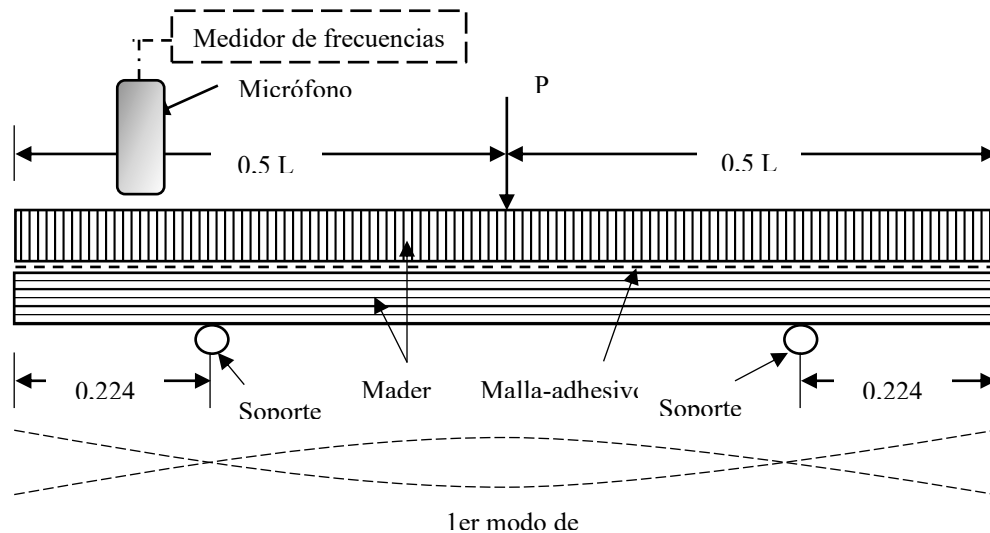


Figura 51. Configuración de las pruebas de vibraciones transversales.

Todas las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de $20\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$) y humedad relativa del aire de $65\text{ }(\pm 1\text{ } \%)$ hasta que alcanzaron su contenido de humedad en equilibrio de $10\text{ } \%$ para la madera sólida y de $8\text{ } \%$ para el multimaterial.

Probeta de multimaterial

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad (CH), se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta. Con tal propósito, se utilizó el medidor de frecuencia *Grindosonic*®. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso (Figura 51). Las vibraciones fueron registradas con un micrófono y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de 1 Hz. Se realizaron tres impactos y su promedio se consideró como su frecuencia.

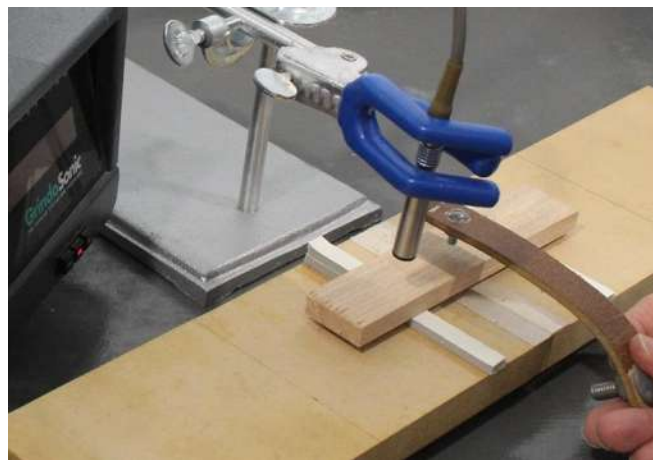


Figura 52. Pruebas de vibraciones transversales. Probeta de madera sólida

La cara superior del multimaterial está alineada en la dirección tangencial de la madera. En cambio, la cara inferior está orientada en la dirección longitudinal. En cada prueba se realizaron tres impactos en el lado superior de la probeta y su promedio se consideró como la frecuencia en la posición A. Una vez terminada la prueba en la posición A, se giró la probeta 180° alrededor de su

eje longitudinal y se repitió la experiencia. A esta medición se le consideró como la frecuencia en la posición B. De esta forma, se midieron dos frecuencias por probeta.

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una barra continua, de sección transversal rectangular, con geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal sobre apoyos simples, representando un sistema a un grado de libertad e idealizando la madera como un material elástico. Así, el análisis modal se realizó a partir de la ecuación de movimiento (16) en vibraciones transversales de una barra equivalente a la probeta presentada en las Figuras 1 y 2 (Weaver, Timoshenko y Young, 1990):

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m_1 r^2 + \frac{EI m_1}{K' AG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_1^2 r^2}{K' AG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (16)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad de la madera (N m⁻²)

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m⁴)

m₁ = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg m⁻¹)

A = Área de la sección transversal de la probeta (m²)

G = Módulo de rigidez de la madera (N m⁻²)

y = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m)

x = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m)

t = Tiempo (s)

K' = Factor de forma en cortante. (0,833 para probetas prismáticas)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m²)

Con: $r = \sqrt{I/A}$

En la ecuación (16), el primer término de la izquierda está ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia del movimiento, el tercer término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal de la probeta y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno. Una solución numérica de la ecuación (16) para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple-simple, ha sido aplicada en estudios con madera por Faydi *et al.*, (2017). Con esta ecuación (17) se calculó el módulo dinámico:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right] \quad (17)$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (N m⁻²)

L = Longitud de la probeta (m)

L_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f = Frecuencia natural (Hz)

ρ_{CH} = Densidad (kg m⁻³)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m²)

m, K = Constantes adimensionales (12,65; 49,48)

El índice material se calculó con la ecuación (18) (Král *et al.*, 2015):

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{CH}} \quad (18)$$

Donde:

I_{vt} = Índice material (m² s⁻²)

E_{vt} = Módulo dinámico (N m⁻²)

ρ_{CH} = Densidad (kg m⁻³)

Diseño experimental

Se preparó un diseño completamente al azar y balanceado. La unidad experimental consistió en dos grupos de probetas. Uno de madera sólida y otro de multimaterial. Las variables de respuesta fueron la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico (Ecuación 17) y el índice material (Ecuación 18). La elaboración del multimaterial se considera el tratamiento. Para las ocho muestras (cuatro variables × dos grupos) se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$).

Para verificar la uniformidad de las mediciones entre las frecuencias medidas en las posiciones A y B, se realizó una prueba de diferencias de medias suponiendo varianzas iguales con la hipótesis nula $H_0: \mu_{fA} = \mu_{fB}$ donde los subíndices se refieren a las frecuencias medidas en las posiciones A y B. Para cada par de muestras independientes (multimaterial versus madera sólida) se realizaron igualmente pruebas de diferencias de medias con la hipótesis nula $H_0: \mu_{ms} = \mu_{MM}$ donde los subíndices ms se refieren a datos de la madera sólida y MM a los del multimaterial.

Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95 %. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax + b$) de los módulos dinámicos como variable dependiente de la densidad y de la frecuencia. Finalmente, se compararon los resultados de esta investigación con los reportados en la bibliografía (Tabla 22).

Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. No obstante que el número de probetas observadas por cada especie fue de 36, cantidad suficiente para considerar en el análisis estadístico la teoría de las grandes muestras, se calculó *a posteriori* el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas para un error aceptable del 0,05. El número de probetas se calculó con la ecuación (19) (Gutiérrez y De la Vara, 2012):

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (19)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05).

Resultados y discusión

Para las frecuencias medidas al girar las probetas del multimaterial, la prueba de diferencias de medias resultó con un valor de $P_{(\alpha=0,05)} = 0,961$. De acuerdo al criterio de demarcación establecido

en el diseño experimental, este resultado indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las frecuencias medidas en cada una de las dos caras de las probetas.

Este resultado se puede explicar con los argumentos siguientes: las dos láminas de las probetas están colocadas ortogonalmente en relación con las direcciones longitudinal y tangencial de la madera. De tal forma, durante un ciclo de movimiento, la lámina inferior está solicitada en tensión en la dirección longitudinal, mientras que la lámina superior trabaja en la dirección tangencial. Sin embargo, durante un demi-ciclo del primer modo de vibración las distribuciones de los esfuerzos de flexión son principalmente de tensión en la lámina inferior y de compresión en la lámina superior y al completar un ciclo el estado de esfuerzo es opuesto.

Respecto al eje neutro de las probetas, es ahí donde los esfuerzos cortantes son máximos y se concentran en la capa formada por la malla y el adhesivo. De tal forma, en cada ciclo la sollicitación oscila y la frecuencia es simétrica, independientemente de la posición de la probeta. En consecuencia, para el cálculo subsecuente del módulo dinámico y del índice material derivado, se considera el promedio de las dos frecuencias medidas como uno solo y correspondiente a cada probeta.

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera con vibraciones transversales es de carácter no destructivo y utiliza la hipótesis fundamental en mecánica de la madera propuesta de Jayne (1959) acerca de que la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía, por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella. En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda mecánica denota su capacidad para disipar energía.

Este autor propuso así la hipótesis de que estas propiedades de la madera para almacenar y disipar energía están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos como las correlaciones estadísticas.

Tamaño de la muestra

El número de 36 probetas observadas para cada variable de respuesta es suficiente para considerar la teoría de las grandes muestras en el análisis. Los tamaños de la muestra calculados con la ecuación (19) indican que el número de ejemplares observados satisface también el número de observaciones para las ocho muestras (Tabla 23). Es decir, las mediciones fueron realizadas en muestras homogéneas y representativas.

Tabla 23. Tamaño de las muestras

Especies	e	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	-	n	n	n	n
Madera sólida	0,05	2	9	35	33
Multimaterial	0,05	1	1	7	6
e = Error de estimación aceptable; ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material; n = Tamaño de la muestra.					

Cada parámetro de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial muestran convergencias particulares del tamaño de la muestra en función del error aceptable de 0,05 (Figuras 52 y 53). El número de mediciones necesarias para satisfacer el error aceptable de la densidad y de la frecuencia requieren pocas probetas en comparación con las del módulo dinámico y del índice material. Este fenómeno es más intenso en la madera sólida que en el multimaterial. Se distinguen dos casos límite para la madera sólida: el módulo dinámico y el índice material. Estos dos parámetros son calculados con las ecuaciones (17) y (18) a partir de las mediciones directas de la densidad y de la frecuencia. En cambio, el módulo dinámico y el índice material son variables derivadas donde la densidad y la frecuencia están implícitas.

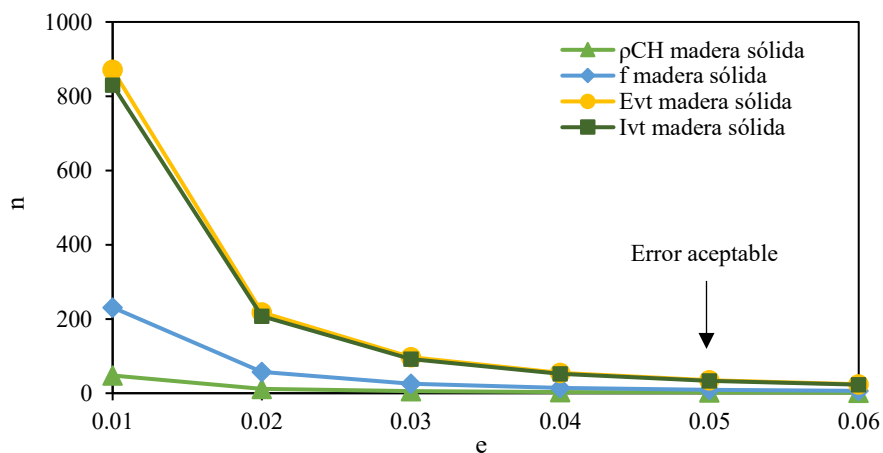


Figura 53. Convergencia del tamaño de la muestra (n) en función del error aceptable (e) para la madera sólida de *Fagus crenata*.

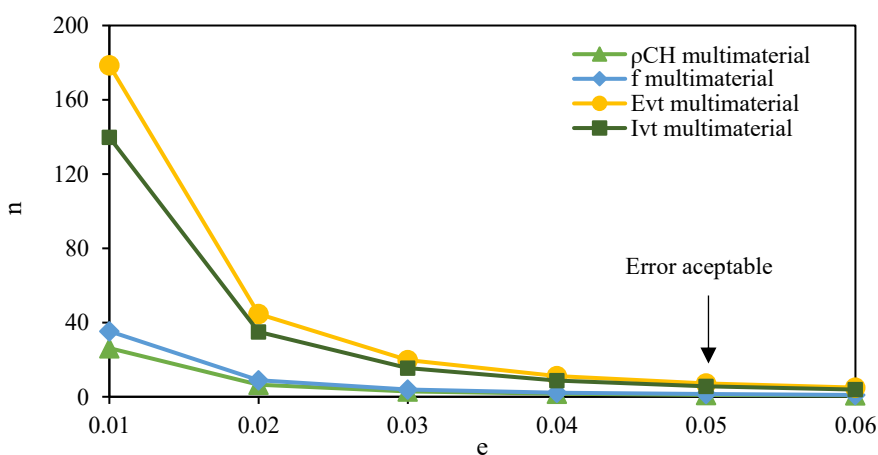


Figura 54. Convergencia del tamaño de la muestra (n) en función del error aceptable (e) para el multimaterial madera-malla-adhesivo.

Densidades

La prueba de diferencia de medias indica desigualdades estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} < 0,001$) entre las densidades. Así, la densidad del multimaterial aumenta 4,3 % respecto a la de la madera sólida. Esta diferencia puede explicarse por el peso adicional del pegamento y de la malla en el multimaterial.

El coeficiente de variación de la densidad del multimaterial disminuye 24,1 % respecto al coeficiente de la madera sólida. Este resultado indica que el multimaterial reduce la variabilidad natural de la madera de *F. crenata* (Tabla 24).

Tabla 24. Densidad, frecuencia, módulo dinámico e índice material de madera sólida y multimaterial.

	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)	(m ² s ⁻²)
Madera sólida de <i>Fagus crenata</i>				
μ	637	1934	13,573	21,31
σ	22	147	2,003	3,07
CV (%)	(3,5)	(7,6)	(14,8)	(14,4)
Multimaterial				
μ	664	2019	14,725	22,16
σ	17	60	984	1,31
CV (%)	(2,6)	(3,0)	(6,7)	(5,9)
ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento.				

Las correlaciones entre la densidad y el módulo dinámico (Figura 54) indican un coeficiente de determinación del multimaterial cinco veces mayor que el correspondiente a la madera sólida; y los coeficientes de determinación califican el multimaterial con una correlación baja y nula para la madera sólida de *F. crenata*. Es decir, en el contexto de la presente investigación, la densidad no es un buen predictor del módulo dinámico.

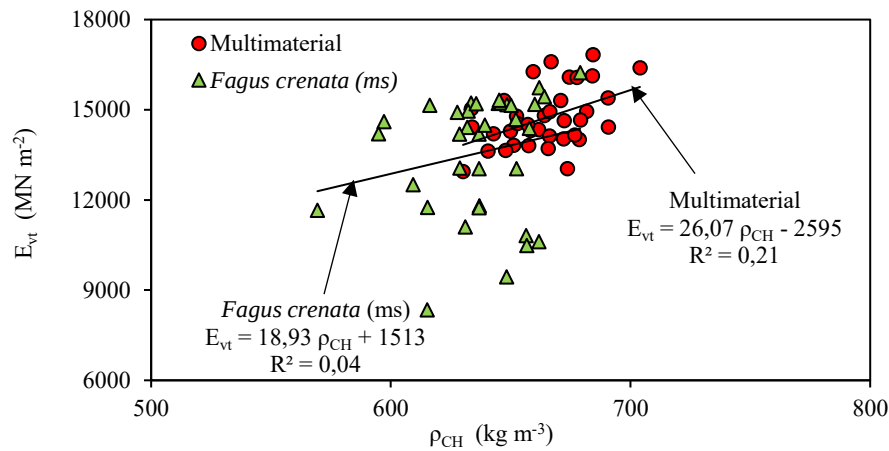


Figura 55. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

Baar *et al.*, (2016) determinan el módulo dinámico empleando frecuencias de vibraciones transversales con un aparato similar al de la presente investigación. Estos autores reportan para las maderas *Azalia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$) coeficientes de variación en la densidad de 4,7 %, 8,9 %, 7,7 % y 10,2 % respectivamente y para los módulos dinámicos de 10,6 %, 9,7 %, 14,9 % y 15,4 %. Estos valores son mayores a los de la densidad y del módulo dinámico de *F. crenata* ($\rho_{CH} = 637 \text{ kg m}^{-3}$) presentados en la Tabla 24. La diferencia puede ser atribuible a la variabilidad entre especies, pero las magnitudes de variación son aceptables en ciencias de la madera.

Frecuencias

Entre las frecuencias de la madera sólida y del multimaterial, la prueba de medias indica diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,002$). Así, la frecuencia del multimaterial aumenta 4,4 % respecto a la de la madera sólida. Este resultado se explica por las diferencias en dimensiones y masas entre las probetas de madera sólida y del multimaterial.

La frecuencia es un buen predictor del módulo dinámico. El coeficiente de determinación entre estos dos parámetros de la madera sólida califica la correlación como muy alta y para el

multimaterial califica como alta (Figura 55). El rango de la frecuencia para la madera sólida es de 535 Hz (Tabla 24). En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 253 Hz, es decir, 50,7 % menor, porcentaje que indica que el multimaterial reduce la variabilidad de la frecuencia y se expresa en la disminución de 61,1 % del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida.

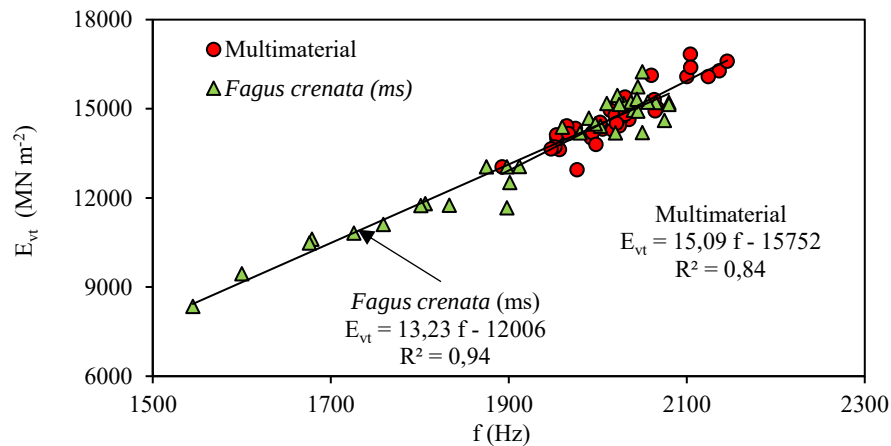


Figura 56. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la frecuencia (f) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

Módulos dinámicos

La prueba de diferencias de medias entre los módulos dinámicos indica diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,003$). Así, el módulo dinámico del multimaterial aumenta 8,5 % respecto a la de la madera sólida. Este resultado puede explicarse por el efecto del tratamiento de elaboración del multimaterial en el cual se adiciona la rigidez de la malla y su combinación con el adhesivo ligado mecánicamente con la madera de *F. crenata* (Clauß *et al.*, 2011).

El rango del módulo dinámico para la madera sólida es de 7896 MN m⁻². En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 3886 MN m⁻², es decir, 50,7 % menor. Este porcentaje indica que el multimaterial reduce la variabilidad del módulo dinámico y se expresa en la disminución de -54,7 % del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida. Este

resultado coincide con el de la reducción en la variabilidad de la frecuencia. Así, si disminuye la variación en las mediciones de la frecuencia, se reduce la variación en el módulo dinámico. La calidad de un sistema de clasificación de resistencia está determinada principalmente por dos factores: la capacidad de los parámetros medidos para predecir el módulo dinámico y el error de medición de los parámetros predictores.

El primero se puede cuantificar mediante análisis de regresión con el coeficiente de determinación (R^2) y el segundo mediante el coeficiente de variación (CV) que representa el error de medición. Si el análisis de regresión se basa en mediciones realizadas en las mismas condiciones y el mismo aparato, el efecto del error de medición y el coeficiente de variación ya está incluido directamente en el valor R^2 . De lo contrario, si las mediciones se realizan en condiciones de laboratorio diferentes, el efecto del error de medición debe considerarse por separado, al evaluar la efectividad de un determinado sistema de clasificación de resistencia (Hanhijärvi, Ranta-Maunus y Turk, 2005).

Este argumento permite proponer que, si dos variables indican una correlación fuerte, la precisión de sus mediciones o cálculo son aceptables. Al mismo tiempo, el incremento o disminución del coeficiente de variación es un indicador del aumento o de la disminución de la variabilidad de los parámetros determinados.

El coeficiente de variación representa la calidad de las mediciones. Sin embargo, este estadístico no explica de manera explícita el origen de la variabilidad, en este caso, si se trata del error introducido por el instrumento de medición, por el operador y/o por la variabilidad natural atribuible a las características mecánicas de los dos tipos de probetas en estudio. Este argumento indica que la variabilidad natural de los parámetros medidos en la madera sólida de *F. crenata*, disminuye al ser trasformada en multimaterial.

Los valores medios del módulo dinámico de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan cerca de la tendencia que indica la correlación densidad-módulo dinámico (Figura 56) calculada a partir de los datos de Sotomayor (2019). Asimismo, los módulos dinámicos se sitúan por encima del promedio para maderas mexicanas y son del mismo orden que los reportados por

Baar *et al.*, (2016) para especies con densidades mayores a las de *F. crenata* y del multimaterial: *Afzelia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 12500 \text{ MN m}^{-2}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 17500 \text{ MN m}^{-2}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 16400 \text{ MN m}^{-2}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 15800 \text{ MN m}^{-2}$).

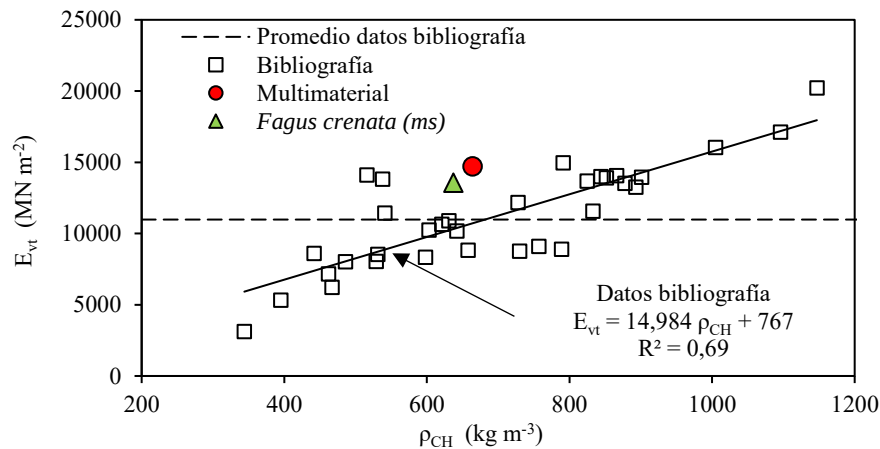


Figura 57. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

Para asegurar la integridad estructural de la madera y en consecuencia su funcionamiento como elemento resistente, la industria de la construcción requiere que las especies con potencial para su incorporación en el proceso constructivo estén caracterizadas mecánicamente (Joint Committee on Structural Safety, 2006).

La determinación del módulo de elasticidad, determinado por métodos no destructivos, proporciona al ingeniero y/o constructor con madera uno de los parámetros necesarios al cálculo estructural. El módulo de elasticidad derivado de pruebas de vibraciones transversales produce información que puede ser utilizada como índice comparativo de la calidad de una especie en particular y como parámetro de ingeniería necesario al análisis estructural probabilístico y sísmico (Dietsch y Köhler, 2010; Sousa *et al.*, 2013).

Índices materiales

Para los índices materiales la prueba de diferencias de medias indica que no hay diferencia significativa ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,131$) entre los índices materiales de *F. crenata* y los del multimaterial (Tabla 24). Sin embargo, la magnitud del índice material del multimaterial aumenta 4,0 % respecto a la de la madera sólida. Este parámetro se calcula con la Ecuación (18) de tal forma que, si el módulo dinámico y la densidad se incrementan en el multimaterial, su índice material lo hace proporcionalmente. De manera análoga a la densidad, frecuencia y módulo dinámico, el coeficiente de variación disminuye -59,0 % por el efecto de transformar la madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo.

Los valores medios del índice material de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan en la nube (Figura 57) formada por los datos de Sotomayor (2019). Las magnitudes del índice material de la madera sólida y del multimaterial son mayores a los reportados por Sotomayor (2019) para maderas mexicanas con densidad similar a la de *F. crenata*: *Tabebuia rosea* $I_{vt} = 17,2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, *Fraxinus americana* $I_{vt} = 17,3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y *Fagus mexicana* $I_{vt} = 15,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (Tabla 22). Además, los resultados para *F. crenata* y el multimaterial madera-malla-adhesivo (Tabla 24) son del mismo orden que los reportados como módulo específico por Baar *et al.*, (2016) para *Azelia* sp ($I_{vt} = 16,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Intsia* sp ($I_{vt} = 21,0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Astronium* sp ($I_{vt} = 20,1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) y *Millettia* sp ($I_{vt} = 18,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$).

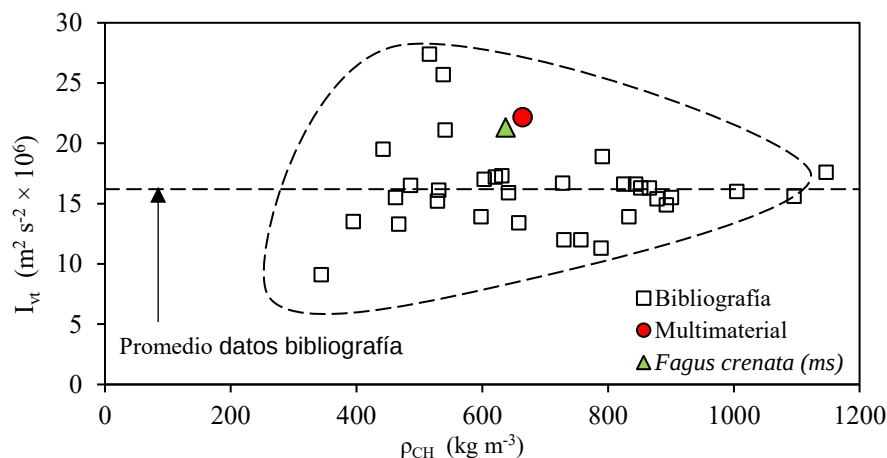


Figura 58. Dispersión del índice material (I_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

En la industria de la construcción, la madera sólida funciona como elemento estructural con el objetivo técnico de minimizar peso y optimizar las propiedades de resistencia. El índice material de la madera interpreta su capacidad elástica ponderada por su densidad. Una de las aplicaciones básicas de este indicador es como referencia para la selección de materiales en el proceso de diseño.

Considerando que el índice material es particular a cada especie, el multimaterial formado por madera de *F. crenata*, malla galvanizada y adhesivo a base de poliuretano muestra un alto valor comparativo con la madera sólida de otras especies. De tal forma, que exhibe un potencial de calidad para su empleo en construcción y arquitectura con madera. Por ejemplo, el índice material de la madera, derivado de pruebas dinámicas, es útil en el cálculo estructural de componentes cuya función es de aislamiento acústico o disipación de energía, y en el diseño de estructuras expuestas a eventos excepcionales como son los sismos.

Así, para componentes constructivos con restricciones de dimensiones específicas y sometidos a movimientos, o situaciones donde es necesario maximizar la disipación de energía, un alto índice material ofrece ventajas comparativas frente a otro material para su funcionamiento en pisos, muros y techos, y en componentes como las vigas, viguetas y columnas, así como en tableros y/o placas para revestimiento donde es necesario maximizar la rigidez, pero minimizar la masa y la transmisión de sonido.

Conceptualmente, el multimaterial es una membrana, representada por la malla de acero galvanizada, arropada y/o protegida por dos elementos aislantes y/o protectores de un biomaterial y ambos unidos por un adhesivo *ex profeso*. Esta membrana puede ser remplazada por uno o varios elementos metálicos, plásticos, biológicos y de fibras naturales y/o sintéticas, los cuales puedan almacenar, disipar y/o transmitir información codificada, por ejemplo, un material aislante de sonido y/o temperatura, un material sensible al movimiento, así como circuitos electrónicos. El adhesivo puede ser sustituido por otro tipo de pegamentos naturales y/o polímeros sintéticos que sean apropiados de acuerdo a las funciones para las cuales se diseñe el multimaterial.

Por su parte, la madera puede ser sustituida por otra especie y/o por una clase de compuestos de madera tales como tableros de partículas, de fibras y de astillas. Su orientación y acomodo pueden

ser modificados para mejorar sus propiedades de anisotropía a conveniencia. Adicionalmente, se puede aumentar el número de piezas de madera y mallas y conformar un material multicapas. La madera como componente del multimaterial puede a su vez ser modificada con procesos de impregnación, densificado y plastificado para mejorar su resistencia al biodeterioro, al fuego, así como para disminuir su higroscopía, heterogeneidad y variabilidad natural.

De tal forma, el multimaterial madera-malla-adhesivo se posiciona en la tendencia del desarrollo de materiales ecológicos y sustentables derivados y/o compuestos de madera con aplicaciones futuras para materiales de electrónica verde, dispositivos biológicos para aplicaciones energéticas y de almacenamiento, así como de transmisión de información (Kües, 2007; Zhu *et al.*, 2016; Sandberg *et al.*, 2017; Mitchel *et al.*, 2018; Sun, Shen y Cao, 2016; Song *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2018; Labans, Kalnins y Bisagni, 2019). En el mismo contexto, el multimaterial se contrasta favorablemente respecto a la madera sólida de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales reportados por Dias y De Alvarez (2017) como se observa en la Figura 58. En esta figura, los módulos elásticos de las maderas angiospermas y gimnospermas, así como los materiales compuestos, tanto comerciales como de los autores citados, son determinados en condiciones estáticas. En cambio, los módulos dinámicos de la madera sólida de *F. crenata* y del material son determinados por vibraciones transversales.

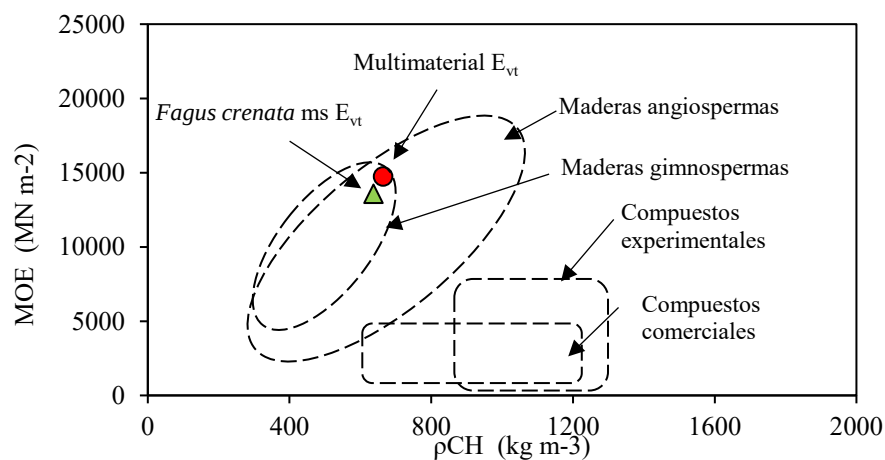


Figura 59. Posicionamiento del multimaterial madera-malla-adhesivo respecto a la madera sólida (ms) de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales.

El empleo de índices materiales que son particulares a componentes trabajando en compresión y flexión puede servir para identificar especies de madera empleadas en proyectos de construcción que, de otro modo, no cumplirían los criterios mínimos para un análisis estructural. Este enfoque sirve para situar en su justa dimensión el empleo para una función, objetivo y restricciones específicas de la especie *F. crenata* y, en el caso de esta investigación, del multimaterial. Así, la selección de una especie de madera empleando índices materiales como criterio de preferencia puede ser útil para especificar los valores mínimos admisibles para el análisis estructural, así como utilizarse para reglamentos de edificación con madera (Sotomayor, 2018).

La aplicación del multimaterial se amplía hacia la ingeniería, la arquitectura y las ciencias de materiales, como un material flexible en sus características termo-físicas, mecano-acústicas y medio-ambientales (Asdrubali *et al.*, 2017). De esta manera, el desarrollo de multimateriales puede contribuir al reciclaje de madera y subproductos de la transformación primaria de árboles, a la valoración de especies con baja apreciación tecnológica para usos estructurales y al aprovechamiento de biomasa forestal como arbustos y matorrales (Papadopoulos, 2020a; Papadopoulos, 2010b).

4.9. Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*.

Resumen:

El objetivo de la investigación fue determinar el módulo de rigidez con pruebas de torsión dinámica en probetas de madera sólida y multimaterial de *F. crenata*. Se prepararon 24 probetas de madera sólida de *F. crenata* con dimensiones de $0,01\text{ m} \times 0,15\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Se realizaron pruebas de torsión, y una vez realizadas estas pruebas y con este mismo material, se elaboraron 12 probetas de multimaterial formado por dos placas de madera sólida cubriendo una malla de acero y todo unido con un adhesivo de dos compones de poliuretano. Con estas probetas se realizó una segunda serie de pruebas de torsión, esta vez en las probetas de multimaterial. Las variables de respuesta fueron la densidad, la frecuencia y el módulo de rigidez de la madera sólida y del multimaterial. Se calcularon su media, su desviación estándar y su coeficiente de variación. Se realizaron pruebas de normalidad y de verificación y de análisis de varianza.

La densidad promedio del multimaterial (662 kg m^{-3}) aumenta 7,2 % en relación a la de la madera sólida (617 kg m^{-3}). La frecuencia del multimaterial (1159 Hz) aumenta 108,5 % en comparación de la de la madera sólida (556 Hz) y el coeficiente de variación de la frecuencia (1,3) disminuye 63,6 % en comparación de la de la madera sólida (3,6). El módulo de rigidez del multimaterial (1130 MN m^{-2}) se incrementa 13,7 % en comparación al de la madera sólida (998 MN m^{-2}) y el coeficiente de variación (2,0) disminuye 71,1 % en comparación de la de la madera sólida (7,1). El multimaterial exhibe una mejora tecnológica por el aumento y por la estabilidad de su rigidez cuando está sometido a deformaciones angulares elásticas. De esta manera, la caracterización mecánica del multimaterial lo prospecta con un potencial de innovación en aplicaciones no tradicionales de la madera sólida en la edificación residencial.

Palabras clave: densidad de la madera, frecuencia de vibración, módulo de rigidez, mejora tecnológica.

Abstract:

The objective of the research was to determine the modulus of rigidity with dynamic torsion tests in solid wood and multimaterial specimens from *F. crenata*. 24 solid wood specimens with dimensions of $0.01\text{ m} \times 0.15\text{ m} \times 0.15\text{ m}$ in radial, tangential and longitudinal directions, respectively, were prepared for torsion tests. After the tests were done, with this same material, 12 multimaterial specimens were made, consisting of two solid wood plates that cover a steel mesh, joined with an adhesive of two polyurethane compounds. With these specimens a second series of torsion tests was carried out. The response variables were the density and the modulus of rigidity of the solid wood and the multimaterial. Its mean, its standard deviation and its coefficient of variation were calculated. Normality and verification tests and analysis of variance were carried out.

The average density of the multimaterial (662 kg m^{-3}) increases 7.2 % in relation to that of solid wood (617 kg m^{-3}). The modulus of rigidity of the multimaterial (1130 MN m^{-2}) increases 13.7% compared to that of solid wood (998 MN m^{-2}) and the coefficient of variation (2 %) decreases 71.1 % compared to solid wood (7.1 %). The multimaterial exhibits a technological improvement due to the increase and stability of its rigidity when it is subjected to elastic angular deformations. In this way, the mechanical characterization of the multimaterial shows its potential for innovation in non-traditional applications of solid wood in residential buildings.

Keywords: wood density, vibration frequency, rigidity modulus, technological improvement.

Introducción

La industria de la construcción reivindica que la madera transite de ser un insumo de origen natural variable, a un material de ingeniería con propiedades mecánicas bien definidas (Markström *et al.*, 2019). De tal forma que el ingeniero, arquitecto y/o diseñador de estructuras y productos de madera tengan elementos para incorporarlo en procesos industriales de manera confiable y económicamente viable (Conroy *et al.*, 2018). En tales circunstancias, se han desarrollado compuestos de fibras, partículas y placas de madera consolidados con adhesivos especiales para usos específicos (Hemmila *et al.*, 2021).

Existen amplias posibilidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que tienen propiedades similares a la madera sin disminución de sus propiedades estéticas, ambientales y sustentables (Milner, 2009; Asdrubali *et al.*, 2017; Caruso *et al.*, 2017). En este contexto, el multimaterial madera-malla-adhesivo se prospecta como un sustituto de la madera sólida para soluciones estructurales y/o arquitecturales (Macedo *et al.*, 2019 CIPA). Información tecnológica sobre multimateriales a base de madera está documentada en Kohl *et al.* (2017). La caracterización de adhesivos a base de poliuretano y su interacción con madera sólida y con compuesto de madera están reportados en Pizzi *et al.* (2020).

El método de vibraciones por torsión requiere poco material y la realización de las pruebas es rápida, cualidades que lo perfilan como una técnica de bajo costo para la caracterización dinámica del comportamiento mecánico de la madera. Por su parte, el módulo de rigidez expresa la resistencia frente a pequeñas deformaciones angulares de una pieza de madera, cuando son provocadas por solicitaciones desalineadas. De tal forma que su rigidez explica la capacidad de deformación entre dos direcciones anisotrópicas de la madera. Así, este parámetro es útil para el cálculo ingenieril y el diseño arquitectónico (Forest Products Laboratory, 2010) y está referido en la literatura para la madera sólida de diferentes especies (Tabla 25). Sin embargo, dada la novedad del multimaterial, no se identificó información de este parámetro en la bibliografía.

Tabla 25. Datos de la bibliografía de la densidad y del módulo de rigidez.

Madera sólida	ρ_{CH}	GLT	Referencia
Especie	(kg m ⁻³)	(MN m ⁻²)	
<i>Paulownia tomentosa</i>	300	703	Komán y Feher (2017)
<i>Thuja plicata</i>	353	320	Sotomayor y Villaseñor (2016)
<i>Cryptomeria japonica</i>	360	784	Anshari <i>et al.</i> (2011)
<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang <i>et al.</i> (2018)
<i>Abies balsamea</i>	393	575	Hernández y Sotomayor (2014)
<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015)
<i>Picea sitchensis</i>	400	400	Yoshihara (2012)
<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz <i>et al.</i> (2014)
<i>Picea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013)

<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	540	922	Sotomayor (2015)
<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	Sotomayor (2016)
<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir <i>et al.</i> (2014)
<i>Taxus baccata</i>	650	1650	Keunecke <i>et al.</i> (2007)
<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar <i>et al.</i> (2013)
<i>Andira inermis</i>	716	1084	Sotomayor (2018a)
<i>Lysiloma acapulcensis</i>	716	1328	Sotomayor (2016)
<i>Fagus crenata</i>	740	637	Naruse (2003)
<i>Psidium sartorianum</i>	789	1067	Sotomayor (2018a)
<i>Juglans pyriformis</i>	810	1369	Sotomayor (2018a)
<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	1511	Sotomayor (2018a)
<i>Albizia plurijuga</i>	844	1792	Sotomayor (2018a)
<i>Quercus scytophylla</i>	933	1294	Sotomayor (2015)
<i>Acosmium panamense</i>	1005	1622	Sotomayor (2018a)
<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	2320	Sotomayor (2018a)
<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	Sotomayor (2016)
ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez.			

Los módulos de elasticidad determinados en condiciones estáticas de *Fagus crenata* Blume divulgados en la bibliografía son: $E_R = 882 \text{ MN m}^{-2}$, $E_T = 588 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_L = 11760 \text{ MN m}^{-2}$; los módulos de rigidez son: $G_{LR} = 980 \text{ MN m}^{-2}$, $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$ y $G_{RT} = 196 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de $740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y un contenido de humedad de 8 % (Naruse, 2003); Los módulos dinámicos por ultrasonido (us) son: $E_{us R} = 2644 \text{ MN m}^{-2}$, $E_{us T} = 1949 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_{us L} = 13992 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 629 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 11 % (Sotomayor *et al.*, 2020). Los subíndices indican las direcciones radiales (R), tangencial (T) y longitudinal (L) de la madera. Para la madera de *F. crenata* no se detectó información acerca del módulo dinámico determinado por vibraciones en torsión. Igualmente, y dada la novedad en la configuración del multimaterial madera-malla-adhesivo de *F. crenata*, no se encontraron datos sobre su caracterización mecánica.

La hipótesis de la investigación propone que como efecto de transformar la madera sólida en multimaterial madera-malla-adhesivo, su módulo de rigidez se incrementa. Para verificar esta conjetura, el objetivo de la investigación fue determinar el módulo de rigidez con pruebas de torsión dinámica en probetas de pequeñas dimensiones de madera sólida y multimaterial de *F. crenata*.

Materiales y métodos

El material experimental consistió en madera de *F. crenata*. Su taxón botánico se determinó mediante la observación de sus características anatómicas en el Laboratorio de Mecánica de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México. Se prepararon 24 probetas de madera sólida de *F. crenata* con dimensiones de 0,01 m $\times$ 0,15 m $\times$ 0,15 m en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Las probetas se elaboraron con madera de albura y se revisó que estuvieran libres de anomalías de crecimiento y de madera de duramen.

Se realizaron pruebas de torsión y una vez realizadas estas pruebas, y con este mismo material, se elaboraron 12 probetas de multimaterial formado por dos placas de madera sólida cubriendo una malla de acero galvanizado y todo unido con un adhesivo de dos compones de poliuretano. Estas probetas se consolidaron con presión y temperatura durante 1 hora.

Las dimensiones de las probetas de multimaterial fueron de 0,02 m de espesor (dos placas de 0,01 m de espesor (altura) $\times$ 0,15 m de ancho (base) $\times$ 0,15 m de largo. Con estas probetas se realizó una segunda serie de pruebas de torsión esta vez en las probetas de multimaterial (Figura 59). Antes y después del tratamiento, la madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad del aire de 65 % hasta que alcanzó un contenido de humedad en equilibrio promedio de 11 %.

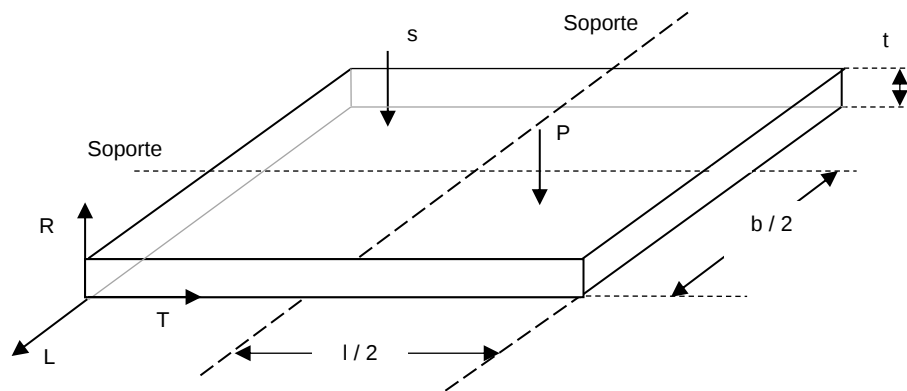


Figura 60. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para aplicar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho).

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la relación peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 (International Organization for Standardization, 2014a). La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad CH, se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 (International Organization for Standardization, 2014b).

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14 (American Society for Testing and Materials, 2015a) y siguen el procedimiento descrito en Sotomayor (2016). La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz. La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo que ocasionó vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma, que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial.

De acuerdo con la norma ASTM E1876-15 (American Society for Testing and Materials, 2015b) en cada una de las probetas, se aplicó un impacto empleando una esfera de acero de 0,005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0,01 m de longitud y de 0,002 m de espesor por 0,007 m

de ancho. El impacto fue aplicado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0,25 del ancho (b) y a 0,25 del largo (l) de cada espécimen (Figura 59). Empleando un aparato *Grindosonic*® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en el punto (s), en una posición simétrica respecto al punto de impacto.

La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0,005%. El módulo de rigidez es rubricado con el subíndice “LT” para identificarlo como derivado de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

El módulo de rigidez de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (20) (American Society for Testing and Materials, 2015b):

$$G_{LT} = \frac{4 l m f^2}{b t} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (20)$$

Donde:

G_{LT} = Módulo de rigidez ($N m^{-2}$)

f = Frecuencia natural (Hz)

m = Masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m)

t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m)

A y B = Constantes de ajuste geométrico

Diseño experimental

Las variables de respuesta fueron la densidad, la frecuencia y el módulo de rigidez de dos unidades experimentales: la madera sólida (ms) y el multimaterial (MM). Así, se formaron seis pares de muestras (multimaterial versus madera sólida por tres variables). Se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Se realizaron pruebas de

normalidad y de verificación y de análisis de varianza con la hipótesis $H_0: \mu_{MM} = \mu_{ms}$, donde los subíndices MM y ms se refieren al multimaterial y a la madera sólida.

Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confiabilidad de 95 %. De tal forma que el criterio de demarcación para señalar una diferencia significativa fueron valores de $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Se calcularon regresiones lineales ($y = ax + b$) y su coeficiente de determinación (R^2) entre el módulo de rigidez como variable dependiente de la densidad y de la frecuencia. Los resultados de esta investigación se compararon con los publicados en trabajos similares.

Resultados

La Tabla 26 presenta los resultados de las pruebas de normalidad, de verificación y análisis de varianza. La Tabla 3 presenta los resultados de las pruebas de torsión. Los resultados de las pruebas de normalidad indican distribuciones uniformes $[-2 < SE \text{ y/o } AE < +2]$ para la densidad, frecuencia y módulo de rigidez de *F. crenata* (Tabla 26). Los resultados de las pruebas de verificación de varianza indican que no existen diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} > 0,05$) entre las muestras del multimaterial y de la madera sólida. En cambio, los resultados del análisis de varianza indican que existen diferencias significativas ($P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$) entre las muestras del multimaterial y de la madera sólida. Estos corolarios muestran que los resultados son uniformes y normalmente repartidos, lo que asegura la calidad de las mediciones y la validez de las magnitudes de los parámetros determinados.

Tabla 26. Resultados pruebas de normalidad, verificación y análisis de varianza.

	SE	AE	Ver-var	Anova
	$[-2, +2]$	$[-2, +2]$	$(P_{(\alpha = 0,05)})$	$(P_{(\alpha = 0,05)})$
ρ_{CH} MM	-1,001	0,019	0,145*	$< 0,001\#$
ρ_{CH} ms	0,178	-1,180	-	-
f MM	-0,044	-0,170	0,658*	$< 0,001\#$
f ms	0,101	1,141	-	-
GLT MM	-1,272	0,966	0,059*	$< 0,001\#$
GLT ms	0,680	1,167	-	-

SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; ANOVA = Análisis de varianza; MM = Multimaterial; ms = Madera sólida; * = No existe diferencia significativa ($P_{(\alpha=0,05)} > 0,05$); # = Existe diferencia significativa ($P_{(\alpha=0,05)} < 0,05$).

Tabla 27. Resultados pruebas de torsión.

	Multimaterial			Madera sólida		
	ρ_{CH}	f	G_{LT}	ρ_{CH}	f	G_{LT}
	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)
μ	662	1159	1130	617	556	998
σ	15,6	15,1	23,0	8,3	19,9	70,5
CV	(22,4)	(1,3)	(2,0)	(1,4)	(3,6)	(7,1)
ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; G_{LT} = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.						

Discusión

La densidad del multimaterial aumenta 7,2 % en relación a la de la madera sólida (Tabla 27). Esta diferencia se explica por la adición del peso de la malla y del adhesivo al fabricar las probetas de multimaterial. El peso promedio de sus dos componentes de madera de *F. crenata* (placas de 0,01 m de espesor $\times$ 0,15 m de ancho $\times$ 0,15 m de largo) es de 0.178 kg, el de la malla (0,15 m de ancho $\times$ 0,15 m de largo) es de 0,0135 kg y el del pegamento solidificado es de 0,006 kg. Estos valores promedio resultan en un coeficiente de variación de la densidad del multimaterial con un incremento de 74,4 % en relación a la de la madera sólida (Tabla 27), magnitud ocasionada por la variación natural del peso de cada placa de madera y en la cantidad de pagamento remanente en estado sólido después del proceso de elaboración del multimaterial.

La densidad de la madera sólida se agrupa en un intervalo con una amplitud de 22 kg m⁻³ (mínimo 607 kg m⁻³, máximo 628 kg m⁻³) que coincide con un coeficiente de variación de 1,4 % (Tabla 3 y Figura 60). En cambio, la densidad del multimaterial indica un intervalo de 52 kg m⁻³ (mínimo 630 kg m⁻³, máximo 682 kg m⁻³) que corresponde a un coeficiente de variación de 2,4 % (Tabla 26 y Figura 27). Este aumento en la variabilidad de la densidad del multimaterial respecto a la de la

madera sólida puede ser atribuido a la diferencia en la retención de adhesivo durante la elaboración del multimaterial, y la variación de las densidades de los dos componentes de madera sólida que constituyen una probeta de multimaterial. Este argumento sugiere controlar mejor las condiciones de preparación de las probetas de multimaterial con objeto de disminuir la variación en su densidad.

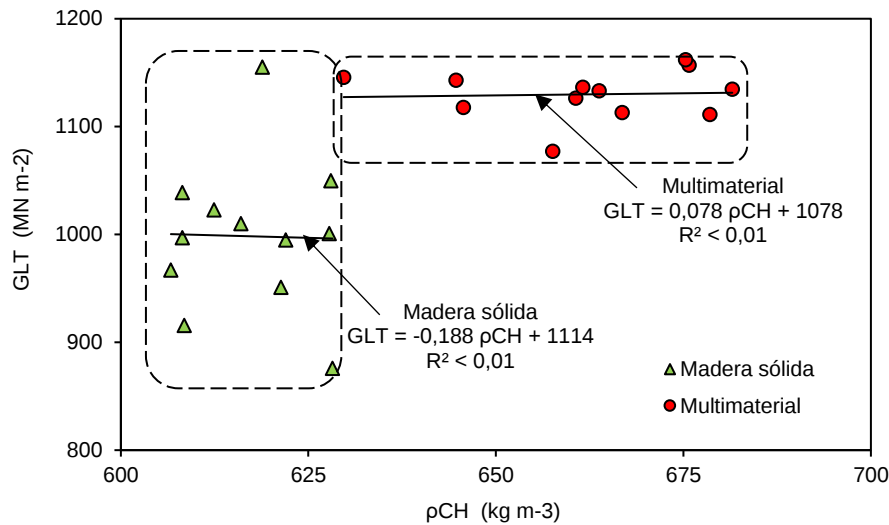


Figura 61. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de *F. crenata*.

La densidad de la madera sólida y del multimaterial no es un buen predictor del módulo de rigidez ($R^2 < 0,01$, Figura 60). Por una parte, los dos intervalos de densidades son estrechos y corresponden a doce probetas de una sola especie, lo que no permite observar el incremento del módulo de rigidez en función de la densidad de la madera como se observa cuando el intervalo de la densidad es amplio ($R^2 = 0,76$, Figura 61). No obstante, el módulo de rigidez de la madera sólida de *F. crenata* se agrupa en la nube respecto a la densidad con un intervalo con amplitud de 279 MN m⁻² (mínimo 876 MN m⁻², máximo 1155 MN m⁻²). En cambio, el módulo de rigidez del multimaterial se agrupa entorno al intervalo de 85 MN m⁻² (mínimo 1077 MN m⁻², máximo 1162 MN m⁻²). De tal forma que el módulo de rigidez del multimaterial se incrementa 13,7 % en comparación al de la madera sólida y el coeficiente de variación disminuye 71,1 %.

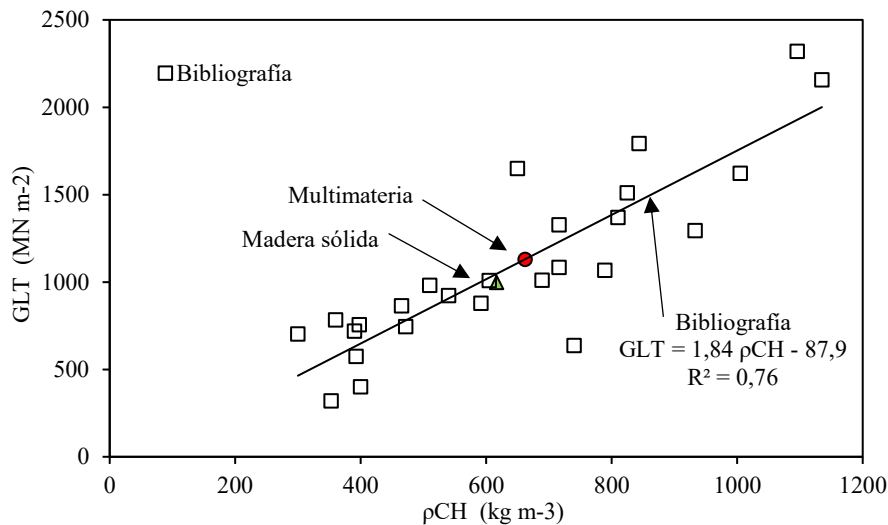


Figura 62. Posicionamiento del módulo de rigidez (G_{LT}) de la madera sólida y del multimaterial de *F. crenata* en función de la densidad (ρ_{CH}) en relación a la correlación calculada con datos de la bibliografía (Tabla 1).

En el mismo contexto, los valores del módulo de rigidez de la madera sólida y del multimaterial se posicionan cerca de la tendencia marcada por la correlación entre G_{LT} y ρ_{CH} (Figura 61) de los datos reportados en la bibliografía (Tabla 25), resultado que indica que como efecto de transformar la madera sólida en multimaterial madera-malla-adhesivo, el módulo de rigidez se incrementa. Este corolario puede explicarse desde dos perspectivas:

La primera es el hecho de colocar las dos placas de manera ortogonal con respecto a la dirección radial de la madera lo que le permite menos deformación a esfuerzos de torsión, de tal forma que se minimiza el efecto de las propiedades de ortotropía material de la madera; la segunda perspectiva es la incorporación de la malla embebida y consolidada con un adhesivo lo que produce un endurecimiento del plano longitudinal-tangencial en el eje neutro de la probeta solicitada en torsión (Figura 59) y que están relacionadas con los factores de ajuste geométrico utilizados en la fórmula (20) para determinar el módulo de rigidez correspondiente al plano longitudinal-tangencial.

La frecuencia del multimaterial aumenta 108,5 % en comparación la de la madera sólida.

La magnitud de la frecuencia depende de la rigidez del sistema en estudio, en este caso representada por el módulo dinámico de la madera, así como por su masa y su geometría (Fórmula 20). Las

probetas de multimaterial contienen más del doble de masa respecto a las probetas de madera sólida. Además, en el multimaterial se incorpora la malla como elemento estabilizador y una capa de adhesivo endurecido y aglutinador de los diferentes componentes del sistema. Así, la reconfiguración de un paralelepípedo de madera sólida en uno de multimaterial es el factor que incrementa su rigidez y en consecuencia su frecuencia. Por otra parte, el coeficiente de variación de la frecuencia disminuye 63,6 % en comparación al de la madera sólida (Tabla 27), resultado que denota una mejoría en lo referente a la disposición de la madera como material de ingeniería. Para la madera sólida de *F. crenata*, la frecuencia es un buen predictor del módulo de rigidez (Figura 62). En cambio, para el multimaterial, la frecuencia indica un coeficiente de determinación bajo.

Los intervalos de los valores de la frecuencia y del módulo de rigidez de la madera sólida son más amplios comparativamente a los del multimaterial, lo que permite mejorar el coeficiente de determinación. Por su parte, los valores de la frecuencia y del módulo de rigidez del multimaterial se agrupan en intervalos más estrechos (Figura 62). Este resultado confirma la disminución del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida. Es decir, se observa una disminución del 72 % en la variación del módulo de rigidez determinado en el multimaterial. Este corolario posiciona al multimaterial con un potencial de innovación para usos no tradicionales en la edificación residencial (Conroy et al., 2018).

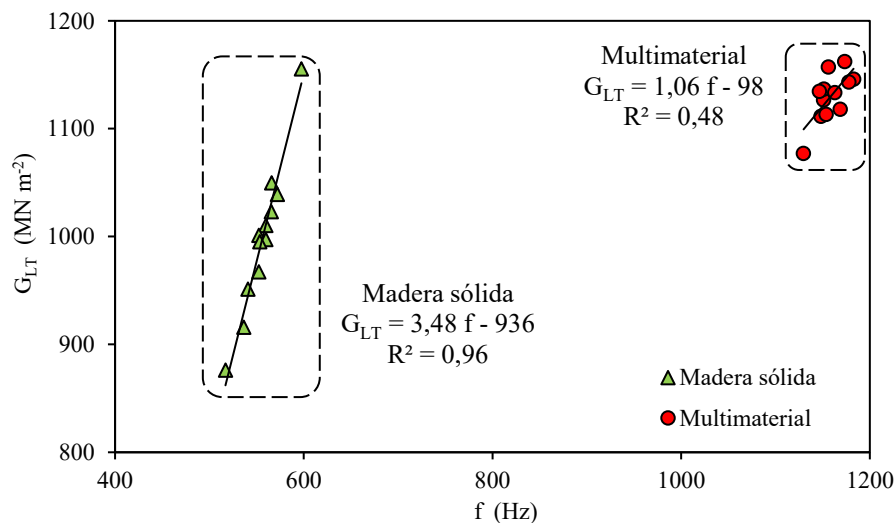


Figura 63. Correlaciones del módulo de rigidez (G_{LT}) en función de la frecuencia (f) de *F. crenata*.

4.10. Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas.

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad básica, el contenido de humedad inicial, el máximo contenido de humedad, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia*. La variabilidad de las características higroscópicas de las maderas estudiadas puede explicarse por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie. Sin embargo, sus correlaciones estadísticas, así como sus magnitudes se sitúan en los rangos reportados en la bibliografía.

Palabras clave: variabilidad, hidratado de la madera, secado de la madera, correlaciones estadísticas.

Abstract

The objective of the research was to determine the basic density, the initial moisture content, the maximum moisture content, the fiber saturation point, the cell wall percentage and the void space percentage of eight Mexican woods: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* and *Guazuma ulmifolia*. The variability of the hygroscopic characteristics of the woods studied can be explained by the differences in the anatomical characteristics of each species. However, their magnitudes are within the ranges reported in the bibliography.

Keywords: Variability, wood hydration, wood drying, statistical correlations.

Introducción

La demanda de materiales sostenibles y procesos responsables con el ambiente en la industria de la construcción ha generado un renovado interés en la investigación de las propiedades esenciales de la madera y sus aplicaciones derivadas, específicamente, para el desarrollo de sistemas de adaptación arquitectónicos de baja tecnología. La capacidad de diseñar compuestos de madera cuyo estado de tensión permanezca limitado bajo los cambios de la humedad ambiental es beneficiosa para cualquier aplicación de ingeniería, sometida a una variación repetida de la carga, como son los sistemas adaptativos (Abdelmohsen *et al.*, 2019).

La investigación de la densidad y las características higroscópicas de la madera encuentran aplicación práctica en el diseño de productos y en la concepción de piezas de ingeniería de este material. Otra aplicación a nivel industrial es el comportamiento y control de procesos industriales. Por ejemplo, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de espacios vacíos, el porcentaje de pared celular y el máximo contenido de humedad de una especie son parámetros necesarios para optimizar los procesos de secado y/o de impregnado de madera (Tamarit y Fuentes, 2003).

El fenómeno de la higroscopía en la madera sólida se observa desde dos escalas: a nivel micro, se estudia la proporción de los componentes químicos fundamentales de la madera que determinan sus propiedades higroscópicas (Berry y Roderick, 2005). A nivel macro, se analiza el acomodo relativo de los tejidos celulares que forman capas de crecimiento, lo que resulta en las propiedades de anisotropía de la madera (De Almeida *et al.*, 2014).

Las investigaciones sobre el fenómeno de higroscopía están orientadas preferentemente a: 1. Caracterizar la expansión y/o la contracción dimensional de la madera ocasionadas por tratamientos de humidificación y/o de secado (Hamid *et al.*, 2011; Ajuziogu *et al.*, 2020); 2. Determinar los parámetros relacionados con la higroscopicidad de la pared celular de la madera, como son el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad que puede contener la madera, las proporciones de la pared celular y de los espacios vacíos del tejido celular (Fuentes, 2000; Tamarit y Fuentes, 2003; Hernández, 2007b); 3. Mejorar la estabilización dimensional de la madera por tratamientos químicos (Herrera-Builes *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Németh *et al.*, 2020), térmicos

(Schneid *et al.*, 2014; Schorr y Blanchet, 2020) y mecánicos (Fang *et al.*, 2011; Laine *et al.*, 2013; El-Dabaa y Abdelmoshen, 2019); 4. Identificar caracteres intrínsecos de la madera como factor de variación dimensional (Berry y Roderick, 2005; Engelund *et al.*, 2013; Ávila y Herrera, 2012); y 5. Estudiar su estructura anatómica (Nakano, 2003; Ištók *et al.*, 2016) y su composición química (Hernández, 2007a; Sahin, 2010) como agentes que afectan el fenómeno de higroscopia.

La información sobre las características higroscópicas de maderas endémicas de México está recopilada en Tamarit y Fuentes (2003), Tamarit y López (2007), Silva *et al.* (2010) y Bárcenas (2020). Debido a la biodiversidad en las características anatómicas entre especies y a las particularidades en los procedimientos experimentales utilizados, la bibliografía reporta una amplia variedad en las magnitudes de los parámetros calculados. Con excepción de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) quienes retoman los datos del *Estudio promocional de 43 especies de la Selva Lacandona*, realizado en 1980 [Anexo] y publicado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1982), no hay un estudio intensivo de las características higroscópicas medibles durante procesos controlados de humidificación y secado. Así, parece razonable la caracterización de su comportamiento higroscópico desde un enfoque de análisis especie por especie y la síntesis integral de resultados obtenidos en condiciones experimentales similares.

El objetivo de la investigación fue determinar las características higroscópicas de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez y *Guazuma ulmifolia* Lam. Algunas de estas características de las especies en estudio están reportadas en investigaciones anteriores. Con todo, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

Materiales y métodos

El material experimental proviene del banco de maderas que forma parte del programa de caracterización física y mecánica de especies mexicanas, del Laboratorio de Mecánica de la Madera, en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento

(temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; humedad relativa del aire de $65\% \pm 5\%$) hasta que su peso fue constante. Para cada una de las especies, se recortaron 18 probetas con dimensiones de $0,02\text{ m} \times 0,02\text{ m} \times 0,06\text{ m}$ alineados en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) respectivamente.

Las pruebas de higroscopía consistieron en las siguientes etapas: 1. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado de humedad inicial de la madera; 2. Hidratación de las probetas en un baño de agua con temperatura de 20°C durante 72 horas; 3. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado saturado después del tratamiento de hidratado; 4. Secado de las probetas en un horno con temperatura de 103°C durante 48 horas; 5. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado anhidro después del tratamiento de secado. La Fig. 63 ilustra el contenido de humedad en los diferentes estados de la madera en función del tiempo de hidratado y de secado. La Tabla 28 presenta las ecuaciones utilizadas y los símbolos utilizados para calcular los parámetros estudiados.

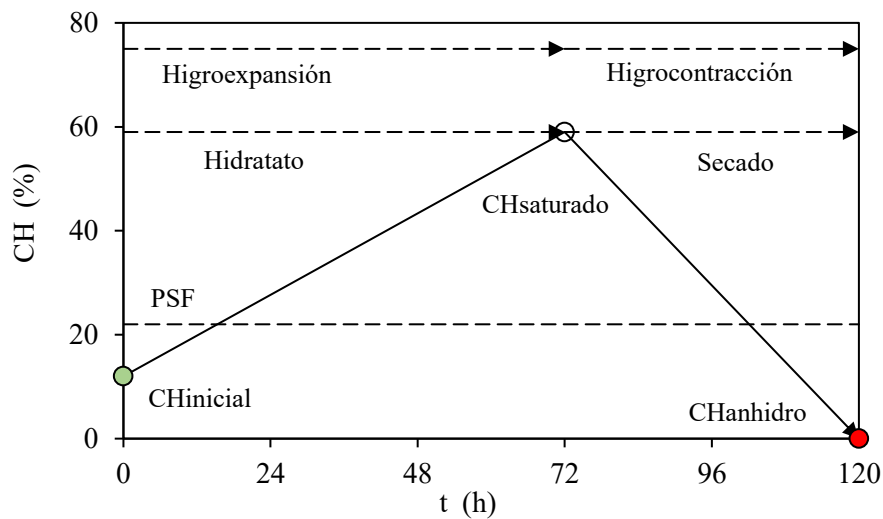


Fig 64. Contenido de humedad (CH) en función del tiempo en las pruebas de higroscopía.

Tabla 28. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados.

Ecuaciones	No.	Referencias
$CH_{ini} = \left(\frac{P_{ini} - P_{anhidro}}{P_{anhidro}} \right) \times 100$	(1)	Chiniforush <i>et al.</i> (2019)
$\rho_0 = \frac{P_{anhidro}}{V_{sat}}$	(2)	Koman y Feher (2015)
$MCH = \left(\frac{1530 - \rho_0}{1530 \times \rho_0} \right) \times 100$	(3)	Tamarit y Fuentes (2003)
$PC = \left(\frac{\rho_0}{1530} \right) \times 100$	(4)	Tamarit y Fuentes (2003)
$EV = \left(1 - \frac{\rho_0}{1530} \right) \times 100$	(5)	Tamarit y Fuentes (2003)
$PSF = \left(\frac{V_{sat} - V_{anhidro}}{V_{sat}} \right) \times \left(\frac{100}{0,9 \times \rho_0} \right)$	(6)	Fuentes (2000)
Símbolos	Subíndices	
CH = Contenido de humedad (%)	ini = Estado de humedad inicial	
ρ_0 = Densidad básica ($kg\ m^{-3}$)	Anhidro = Estado de humedad anhidro	
P = Peso (kg)	sat = Estado de humedad saturado	
V = Volumen (m^3)	Nota: El valor constante de 1530 ($kg\ m^{-3}$) en las ecuaciones (4) y (5) es el de la gravedad específica de la sustancia madera (Tamarit y Fuentes, 2003)	
MCH = Máximo contenido de humedad (%)		
PC = Por ciento de pared celular (%)		
EV = Por ciento de espacios vacíos (%)		
PSF = Punto de saturación de la fibra (%)		

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en madera de ocho especies: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia*. La estrategia experimental se orientó hacia la comparación de resultados especie por especie, la cual se consideró el factor de variación clasificado en ocho niveles. Se evaluaron 18 réplicas (probetas) de cada una de ellas. Así, se estudiaron 144 probetas agrupadas en ocho muestras independientes. Las variables de respuesta fueron: contenido de humedad inicial (ecuación 1), densidad básica (ecuación 2),

máximo contenido de humedad (ecuación 3), punto de saturación de la fibra (ecuación 4), porcentaje de pared celular (ecuación 5) y porcentaje de espacios vacíos (ecuación 6). Para cada muestra se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \mu$)

Para verificar la homogeneidad en las variables densidad básica y contenido de humedad correspondiente al estado inicial de la madera, se realizaron pruebas de normalidad en las distribuciones de sus datos. El criterio de demarcación para aceptar normalidad fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2, +2]$. Asimismo, se realizaron pruebas de verificación (Ver-var) y análisis de varianza (Anova). Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_1 + \mu_2 = 0$, donde μ_1 y μ_2 representan las medias de las muestras y se contrastó con la hipótesis alterna $H_1: \mu_1 + \mu_2 \neq 0$. Se realizaron pruebas de rangos múltiples con el criterio de no aceptar diferencias estadísticamente significativas entre niveles (especies) que comparten una misma columna de X.

Todas las pruebas estadísticas se efectuaron para un nivel de confianza de 95 %. Así, el criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa fue un valor de $P_{(\alpha = 0,05)} < 0,05$. Se evaluaron correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y potencia ($y = ax^b$) y se determinaron los coeficientes de determinación (R^2) de las variables de respuesta en función de la densidad básica. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con datos de la bibliografía adaptados de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b).

Resultados y discusión

Contenido de humedad

Para las ocho maderas, los valores promedio del contenido de humedad inicial fluctuaron entre un mínimo de 8,1 % (*D. palo-escrito*) y un máximo de 9,7 % (*F. mexicana*) y su variación entre especies refleja un coeficiente de variación del 6 % (Tabla 29). Al interior de cada especie, el

contenido de humedad varió desde 6 % (*F. mexicana*) hasta 17 % (*T. donnell-smithii*) (Tabla 30). Por su parte, los valores del sesgo y apuntamiento estandarizados, obtenidos de las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una, se ubican al interior del intervalo que satisface el criterio de demarcación [-2 - +2], lo que permite considerar que estos resultados corresponden a distribuciones normales. Asimismo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para todas las especies. Estos resultados sugieren que el contenido de humedad inicial fue homogéneo en las probetas y no interviene de manera significativa en el análisis subsiguiente. El contenido de humedad inicial es calculado con la Ec. (1) a partir de mediciones directas del peso inicial y el peso en estado anhidro (Fig. 63).

Tabla 29. Densidad básica y características higroscópicas.

Especies	ρ_0	CH _{ini}	PSF	MCH	PC	EV
	(kg m ⁻³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<i>Cupressus lindleyi</i>	388	8,7	20	194	25	75
<i>Cedrela odorata</i>	439	8,9	25	171	29	71
<i>Swietenia macrophylla</i>	460	8,7	20	153	30	70
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	522	8,4	21	127	34	66
<i>Fraxinus uhdei</i>	528	9,5	20	125	35	65
<i>Fagus mexicana</i>	515	9,7	27	129	34	66
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	537	8,1	16	124	35	65
<i>Guazuma ulmifolia</i>	573	9,0	27	110	37	63
μ	495	9,0	22	142	32	68
CV	(12)	(6)	(18)	(20)	(12)	(6)
ρ_0 = Densidad básica; CH _{ini} = Contenido de humedad inicial; CH _{max} = Contenido de humedad máximo experimental; MCH = Máximo contenido de humedad; PSF = Punto de saturación de la fibra; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; μ = Media; CV = Coeficiente de variación en porcentaje y entre paréntesis.						

Tabla 30. Coeficiente de variación (entre paréntesis) para el contenido de humedad y la densidad básica, sesgo estandarizado, apuntamiento estandarizado y grupos homogéneos de las muestras observadas.

	CV	SE*	AE*	Grupos Homogéneos [#]			
Especies	(%)	[-2 - +2]	[-2 - +2]				
	Contenido de humedad (CH)						
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(10)	-1,631	0,836	X			
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(17)	-1,747	1,951	X	X		
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	1,675	0,644	X	X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(8)	0,193	-0,656	X	X		
<i>Cedrela odorata</i>	(9)	1,995	1,459		X		
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(11)	1,110	1,275		X	X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(14)	-1,513	-0,035			X	X
<i>Fagus mexicana</i>	(6)	1,885	0,436				X
	Densidad básica (ρ ₀)						
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	-0,449	-0,914	X			
<i>Cedrela odorata</i>	(19)	-0,663	-0,697		X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(7)	-0,156	-1,177		X		
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(5)	-0,576	-0,063			X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(6)	-0,007	-1,401			X	
<i>Fagus mexicana</i>	(4)	1,467	-0,683			X	
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(13)	0,384	0,084			X	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(7)	-0,038	-0,728				X

* Se acepta normalidad en la distribución de las muestras para valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]; # No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellas especies que comparten una misma columna de X.

El contenido de humedad de la madera en su estado saturado medido experimentalmente después de 72 horas de hidratado (Fig. 63) indica un valor promedio de 59 % con un coeficiente de variación de 20 % y con un mínimo de 42 % para *S. macrophylla* y un máximo de 81 % para *C. lindleyi* (Tabla 2). Estos resultados son semejantes a los reportados por Shukla y Kandem (2010) para nueve

maderas hidratadas durante 48 horas. Sus datos indican un contenido de humedad promedio de 50 % con un coeficiente de variación de 30 % para especies con densidades básicas que van desde 448 kg m⁻³ hasta 950 kg m⁻³. Estos resultados sugieren que el tiempo de hidratado de 72 horas de esta investigación fue suficiente para alcanzar contenidos de humedad en estado saturado superiores a los puntos de saturación de la fibra y suficientes para alcanzar la máxima expansión.

Densidad básica

Las magnitudes promedio de la densidad básica de la madera para cada una de las especies variaron en el intervalo que va desde 388 kg m⁻³ (*C. lindleyi*) hasta 573 kg m⁻³ (*G. ulmifolia*) (Tabla 2) y muestran un coeficiente de variación entre especies de 12 %. En comparación con los datos reportados por Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) con un rango que va desde un mínimo de 317 kg m⁻³ (*S. parahibum*) hasta un máximo de 1060 kg m⁻³ (*Q. skinneri*) (Anexo), la amplitud del intervalo de valores de la densidad básica de la presente investigación es menor. Sin embargo, el coeficiente de variación de 22 % es solamente 4 % menor al calculado para los datos bibliográficos mencionados, el cual es de 26 %.

Los coeficientes de variación, que representan la variabilidad al interior de cada especie, van desde un mínimo de 4 % (*F. mexicana*) hasta un máximo de 19 % (*C. odorata*). Asimismo, las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una indican distribuciones normales (Tabla 3). Las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para *C. odorata* y *S. macrophylla* y para *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana* y *D. palo-escrito*. En este mismo sentido, Sotomayor y Ramírez (2013), a partir del análisis de una base de datos de las características higroscópicas de 134 especies mexicanas, así como De Almeida *et al.* (2017) en su estudio de 15 maderas brasileñas, perciben incompleto el enfoque tradicional de calificar la calidad de una especie o las características de una madera, únicamente en relación con su densidad básica.

Punto de saturación de la fibra

El valor promedio del punto de saturación de la fibra (Ec. 6) de las ocho especies investigadas en esta investigación (Tabla 29) es 4 % menor que el publicado por Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b), el cual es de 26 %. Además, su coeficiente de variación es 8 % menor respecto al calculado para las 43 especies de referencia que es de 26 %. Asimismo, en la presente investigación, la correlación del punto de saturación de la fibra, en función de la densidad básica, indica un coeficiente de determinación bajo, calculado con un estrecho intervalo de densidades básicas para ocho especies. En cambio, el coeficiente de determinación de las maderas referidas de la bibliografía califica como medio para un amplio espectro de densidades básicas de 43 especies (Fig. 64). Por razones de escala en esta figura y en las siguientes no se visualizan todos los puntos analizados.

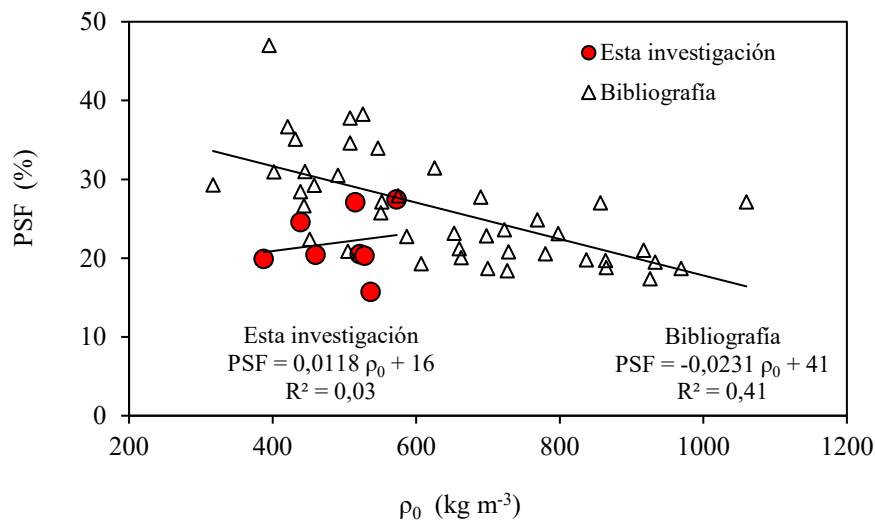


Fig. 65. Correlaciones entre del punto de saturación de la fibra y la densidad básica.

Estos resultados coinciden con los de De Almeida *et al.* (2020) quienes reportan un coeficiente de determinación nulo de 0,09 entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para 15 maderas brasileñas. No obstante, los resultados de la presente investigación van en sentido diferente a los de Hernández (2007b) quien reporta un coeficiente de determinación alto de 0,82, derivado de una regresión lineal con tendencia negativa entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para nueve especies de Perú.

En relación con estudios de grupos de maderas mexicanas, Bárcenas (1995) reporta para especies de la Selva Lacandona valores del punto de saturación de la fibra que van desde un mínimo de 20 % (*Astronium graveolens*) hasta un máximo de 33 % (*Schizolobium parahibum*), todo esto para maderas con densidades básicas desde 300 kg m⁻³ (*Schizolobium parahibum*) hasta 860 kg m⁻³ (*Manilkara zapota*). Sus datos correlacionan linealmente con una tendencia negativa $PSF = -0,0163 \rho_0 + 34,8$ y un bajo coeficiente de 0,33. En el mismo contexto, Fuentes (2000) utiliza datos de diez especies publicados por Bárcenas (1995) y ajusta los valores del punto de saturación de la fibra para calcular una correlación lineal con tendencia negativa $PSF = -0,0265 \rho_0 + 42,4$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0,47$. Por su parte, Tamarit y Fuentes (2003) analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas (1985) y Fuentes (2000). La correlación lineal calculada con sus datos indica una tendencia negativa $PSF = -0,025 \rho_0 + 39,9$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0,47$. Sotomayor y Ramírez (2013) publican una base de datos de características higroscópicas de la madera que contiene datos del punto de saturación de la fibra de 134 especies. En el mismo contexto, el análisis de correlación lineal de los datos de Sotomayor y Ramírez (2014a) indican una tendencia negativa $PSF = -0,0253 \rho_0 + 34,5$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0,47$ para 12 maderas mexicanas.

En estudios puntuales de especies mexicanas, Sotomayor y Ramírez (2014b) publican valores del punto de saturación de la fibra para *Lysiloma* spp. ($\rho_0 = 593$ kg m⁻³) de 25 %; por su parte, Sotomayor (2017) reporta para *Gyrocarpus americanus* ($\rho_0 = 334$ kg m⁻³) un punto de saturación de la fibra de 31 %; y más recientemente, Sotomayor *et al.* (2020) informan del punto de saturación de la fibra para *Enterolobium cyclocarpum* ($\rho_0 = 407$ kg m⁻³) de 23 %, para *C. lindleyi* ($\rho_0 = 438$ kg m⁻³) de 21 % y para *C. odorata* ($\rho_0 = 441$ kg m⁻³) de 24 %, valores para estas dos últimas especies similares a los de esta investigación. La discrepancia en las magnitudes y tendencias estadísticas de los datos publicados es frecuente en investigación en ciencias de la madera. Resultado que muestra la variabilidad natural de las propiedades higroscópicas entre y al interior de una misma especie, originada por la variedad en su estructura anatómica (Sargent, 2019). Sin embargo, las correlaciones indican un decremento del punto de saturación de la fibra a medida que la densidad básica de la madera aumenta, con coeficientes de determinación calificados como medios.

Máximo contenido de humedad

El máximo contenido de humedad varía desde un mínimo de 110 % (*G. ulmifolia*) hasta un máximo de 194 % (*C. lindleyi*) (Tabla 29). El coeficiente de variación entre especies es similar al del punto de saturación de la fibra de las ocho especies estudiadas. A medida que la densidad básica de la madera aumenta, disminuye su capacidad para contener humedad. Este parámetro está calculado con la Ec. (3) que depende de las mediciones de la relación peso anhidro/volumen saturado y está fundamentado en la propuesta de Tamarit y Fuentes (2003) acerca de las relaciones teóricas entre la cantidad de materia presente en un volumen de material poroso como lo es la madera. De tal suerte, a medida que aumenta la densidad básica, disminuye la porosidad y el contenido de humedad máximo disminuye. Este argumento se cuantifica con la correlación potencial entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica de la madera (Fig. 65).

En el mismo contexto, la correlación potencial de la presente investigación es similar a la calculada con los datos de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) (Fig. 65). Además, sigue la misma tendencia estadística de Tamarit y Fuentes (2003) quienes analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas (1985) y Fuentes (2000). La correlación potencial calculada con estos datos indica una tendencia negativa $MCH = 46252560 \rho_0^{-2,10}$ con un coeficiente de determinación muy alto $R^2 = 0,93$.

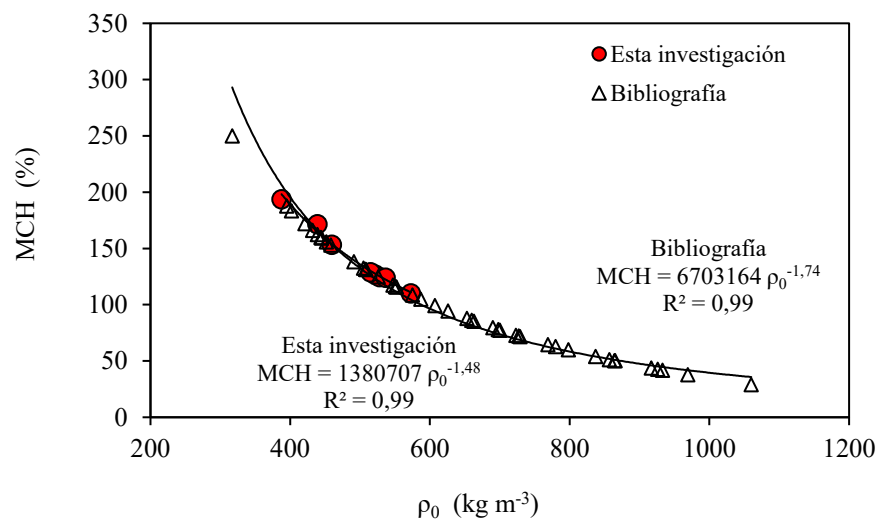


Fig. 66. Correlaciones entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica.

Porciento de pared celular y de espacios vacíos

Las magnitudes promedio del porciento de pared celular (Ec. 4) variaron en el intervalo que va desde un mínimo de 25 % (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 37 % (*G. ulmifolia*). Como complemento al 100 % de un volumen elemental de materia, el porciento de espacios vacíos (Ec. 5) es inversamente proporcional al valor del porciento de pared celular (Tabla 29). Esto es también cierto para los valores promedio de las ocho especies. Sin embargo, el coeficiente de variación del porciento de pared celular es el doble respecto al del porciento de espacios vacíos. El porciento de espacios vacíos es equivalente a la porosidad (Shukla y Kandem, 2010). Así, se confirma que la madera absorbe más humedad a medida que es más porosa (Tamarit y Fuentes, 2003) para las maderas *C. lindleyi*, *C. odorata* y *S. macrophylla*, pero no para las otras cinco especies.

Las correlaciones lineales entre los porcentos de pared celular y de espacios vacíos en función de la densidad básica, calculados con las Ecs. (4) y (5), así como los derivados del análisis de Torelli y Gorišek (1995b) y Tamarit y Fuentes (2003) resultan en modelos similares y con coeficientes de determinación muy altos (Figs. 66 y 67). Para el caso del porciento de pared celular, este aumenta a medida que la densidad básica incrementa (Fig. 66). Lo opuesto se observa para el porciento de espacios vacíos (Fig. 67).

A mayor magnitud de los espacios vacíos (EV), mayor será la porosidad del material. En consecuencia, es mayor la velocidad de hidratado y menor la dificultad para aplicar tratamientos de secado y de impregnación con sustancias de protección. El volumen de espacio vacío interno por unidad de volumen externo que caracteriza a cada especie de madera, predice el volumen máximo de solución preservante que es capaz de absorber. Conociendo esto, se puede variar la concentración de la solución preservante para que se logren los niveles de retención óptimos, siguiendo a Tamarit y Fuentes (2003).

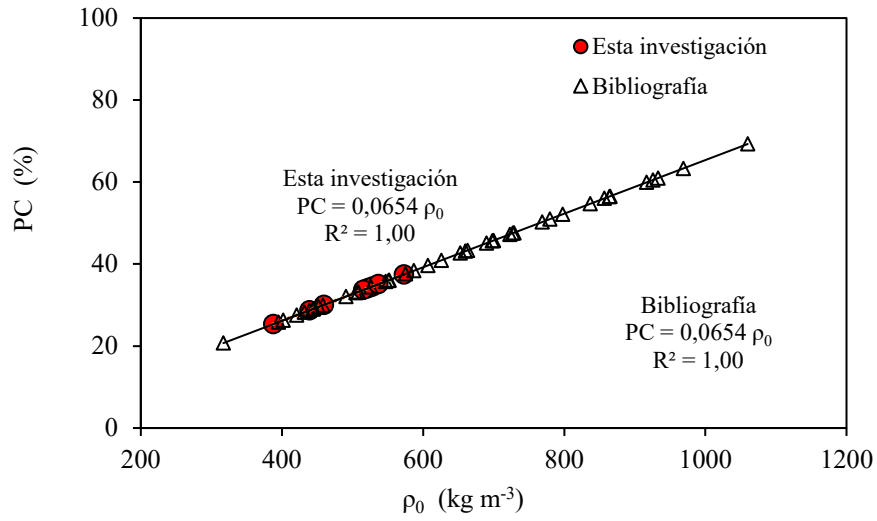


Fig. 67. Correlaciones entre porcentaje de pared celular y densidad básica.

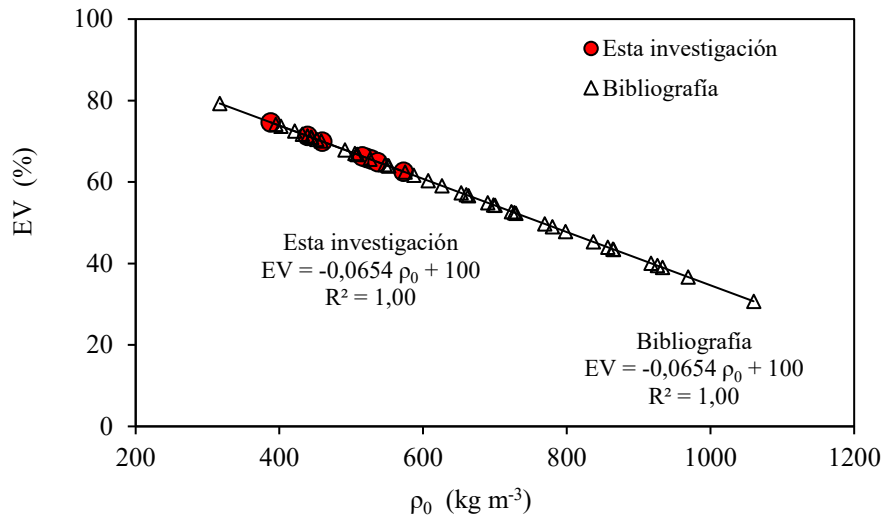


Fig. 68. Correlaciones entre porcentaje de espacio vacío y densidad básica.

Anexo. Densidad básica, máximo contenido de humedad, porcentaje de pared celular, porcentaje de espacios vacíos y punto de saturación de la fibra de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b).

		Características higroscópicas			
	ρ_0	MCH	PC	EV	PSF
Especies	(kg m ⁻³)	(%)			
<i>Alchornea latifolia</i>	402	183	26	74	31
<i>Ampelocera hottlei</i>	690	80	45	55	28
<i>Aspidosperma megalocarpun</i>	798	60	52	48	23
<i>Blepharidium mexicanum</i>	626	94	41	59	31
<i>Brosimum allicastrum</i>	865	50	57	43	19
<i>Bursera simaruba</i>	452	156	30	70	22
<i>Calophyllum brasiliense</i>	575	109	38	62	28
<i>Cordia alliodora</i>	552	116	36	64	27
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	395	188	26	74	47
<i>Dendropanax arboreus</i>	421	172	28	72	37
<i>Dialium guianense</i>	917	44	60	40	21
<i>Dipholis stevensonii</i>	969	38	63	37	19
<i>Guarea glabra</i>	587	105	38	62	23
<i>Guatteria anomala</i>	432	166	28	72	35
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	837	54	55	45	20
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	729	72	48	52	21
<i>Manilkara zapota</i>	926	43	61	39	17
<i>Misanteca pekii</i>	653	88	43	57	23
<i>Nectandra sp.</i>	508	131	33	67	35
<i>Pachica acuática</i>	526	125	34	66	38
<i>Pithecellobium arboreum</i>	700	77	46	54	19
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	505	133	33	67	21
<i>Platymiscium yucatanum</i>	727	72	48	52	18

<i>Poulsenia armata</i>	445	159	29	71	31
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	444	160	29	71	27
<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i>	723	73	47	53	24
<i>Pterocarpus hayesii</i>	508	131	33	67	38
<i>Quercus anglohondurensis</i>	857	51	56	44	27
<i>Quercus skinneri</i>	1060	29	69	31	27
<i>Schizolobium parahibum</i>	317	250	21	79	29
<i>Sebastiana longicuspis</i>	607	99	40	60	19
<i>Sickingia salvadorensis</i>	769	65	50	50	25
<i>Simarouba glauca</i>	439	162	29	71	28
<i>Spondias mombin</i>	491	138	32	68	31
<i>Swartzia cubensis</i>	933	42	61	39	20
<i>Sweetia panamensis</i>	864	50	56	44	20
<i>Swietenia macrophylla</i>	458	153	30	70	29
<i>Talauma mexicana</i>	551	116	36	64	26
<i>Terminalia amazonia</i>	663	85	43	57	20
<i>Vatairea lundelli</i>	780	63	51	49	21
<i>Vitex gaumeri</i>	660	86	43	57	21
<i>Vochysia hondurensis</i>	547	117	36	64	34
<i>Zuelania guidonia</i>	698	78	46	54	23

ρ_0 = Densidad básica; CH = Contenido de humedad inicial; MCH = Máximo contenido de humedad; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; PSF = Punto de saturación de la fibra.

4.11. Higroexpansión, higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar los coeficientes de higroexpansión, de higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia*. Se realizaron pruebas de higroscopía con un procedimiento de humidificación y secado de probetas de pequeñas dimensiones. Las magnitudes de las higroexpansiones e higrocontracciones son similares a las de otras especies mexicanas reportadas en la literatura. Los coeficientes denotan un carácter anisotrópico en las direcciones radial y tangencial. La densidad de la madera es un buen predictor de los coeficientes. Sin embargo, las correlaciones de las relaciones de anisotropía son diferentes a las reportadas en trabajos anteriores.

Palabras clave: coeficiente de higroexpansión, coeficiente de higrocontracción, pruebas de higroscopía, correlaciones estadísticas.

Abstract

The objective of the research was to determine the coefficients of hygroexpansion, hygrocontraction and their anisotropy relationships of eight Mexican woods: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* and *Guazuma ulmifolia*. Hygroscopic tests were carried out with a humidification and drying procedure of small specimens. The magnitudes of hygroexpansions and hygrocontractions are similar to those of other Mexican species reported in the literature. The coefficients denote anisotropic character in the radial and tangential directions. The density of the wood is a good predictor of the coefficients. However, the correlations of the anisotropy relations are different from those reported in previous Works.

Keywords: coefficient of hygroexpansion, coefficient of hygrocontraction, hygroscopic tests, statistical correlations.

Introducción

El conocimiento de las características higroscópicas de la madera encuentra aplicación en el diseño arquitectural (Abdelmohsen *et al.*, 2019; Grönquist *et al.*, 2019), en el cálculo ingenieril (Borgström, 2016; Jacob *et al.*, 2018; Haag *et al.*, 2020), en las tecnologías de reconstitución y modificación de la madera (Sargent, 2019; Yao *et al.*, 2019) y en los procesos de secado y preservación de este material (Tamarit y Fuentes, 2003; Borja *et al.*, 2010; Dickson y Dawson, 2020). En este mismo sentido, la comprensión de la interacción de la humedad del medio ambiente con las características físico-mecánicas de la madera es imprescindible para apreciar su calidad como material de ingeniería (Hering *et al.*, 2012; Engelund *et al.*, 2013), en el desarrollo de nuevos productos (LeDuigou *et al.*, 2019; El-Dabaa y Abdelmoshen, 2019) y para generar información en ciencias, tecnología e ingeniería de la madera (Carmeliet *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019; Sotayo *et al.*, 2020).

Las características higroscópicas de una madera también son de utilidad para determinar su calidad, mediante la comparación de sus magnitudes con otras especies. Una madera es de mejor calidad si se encoje o expande en menor proporción y sobre todo si su relación de anisotropía es mínima (Romagnoli *et al.*, 2014; Hassankhani *et al.*, 2015; Ištók *et al.*, 2016; Machuca *et al.*, 2017; Huda *et al.*, 2018; Abdelmohsen *et al.*, 2019).

Los métodos más usados para determinar los parámetros higroscópicos son: 1. Inmersión en agua (Dubey *et al.*, 2011; Fu *et al.*, 2019) y/o solventes químicos (O'Leary y Hodges, 2001; Pereira *et al.*, 2020); 2. Exposición secuencial a la humedad relativa (García *et al.*, 2005; Derome *et al.*, 2011; Jankowska *et al.*, 2017); 3. Modelado numérico (Derome *et al.*, 2018; Grönquist *et al.*, 2019; Abdelmohsen *et al.*, 2019); 4. Impregnación con aceites (Rowell, 2007; Ávila y Herrera, 2012); 5. Uso de imágenes digitales (Badel *et al.*, 2006; Hansmann *et al.*, 2012; Nopens *et al.*, 2019); y 6. Uso de microscopía electrónica (Almeida *et al.*, 2014; Derome *et al.*, 2013). Otras estrategias de investigación son, por una parte, la implementación de protocolos ad hoc (Sargent, 2019) y por

otra, las investigaciones que se adecúan a protocolos normativos como los propuestos por la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2016a; ISO, 2016b; ISO, 2017a; ISO, 2017b) y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, 2013; ASTM, 2014).

La información sobre la variación dimensional de maderas endémicas de México está recopilada en Torelli y Gorišek (1995a), Torelli y Gorišek (1995b), Tamarit y Fuentes (2003), Tamarit y López (2007), Silva *et al.* (2010), Sotomayor y Ramírez (2013) y Bárcenas (2020). Algunas características de las especies en estudio están reportadas en investigaciones anteriores. Con todo, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

El objetivo de la investigación fue determinar los coeficientes de higroexpansión, de higrocontracción y sus relaciones de higroscopía de las especies: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez y *Guazuma ulmifolia* Lam.

El estudio de las características higroscópicas de estas ocho maderas es de interés tecnológico y comercial porque ellas ejemplifican un amplio intervalo de valores en su densidad, representan diferentes estructuras anatómicas y ofrecen un amplio potencial para la elaboración de nuevos productos con valor agregado (Tamarit y López 2007, Silva *et al.*, 2010 y Bárcenas, 2020).

Materiales y métodos

El material experimental proviene del banco de maderas que forma parte del programa de caracterización física y mecánica de especies mexicanas del Laboratorio de Mecánica de la Madera, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento (temperatura = 20 °C ± 1 °C; humedad relativa = 65 % ± 5 %) hasta que su peso fue constante. Para cada una de las especies, se recortaron 18 probetas con dimensiones de 0,02 m × 0,02 m × 0,06 m en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L), respectivamente.

Las pruebas de higroscopía consistieron en las siguientes etapas: 1. Medición del peso y las

dimensiones de las probetas en estado de humedad inicial de la madera; 2. Hidratación de las probetas en un baño de agua con temperatura de 20° C durante 72 horas; 3. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado saturado después del tratamiento de hidratado; 4. Secado de las probetas en un horno con temperatura de 103 °C durante 48 horas; 5. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado anhidro después del tratamiento de secado. La Tabla 31 presenta las ecuaciones empleadas y los símbolos utilizados para calcular los parámetros estudiados.

Tabla 31. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados.

Ecuaciones	Ecs.	Referencias
$CH_{ini} = \left(\frac{P_{ini} - P_{anhidro}}{P_{anhidro}} \right) \times 100$	(1)	Chiniforush <i>et al.</i> (2019)
$\rho_0 = \frac{P_{anhidro}}{V_{sat}}$	(2)	Koman y Feher (2015)
$PSF = \left(\frac{V_{sat} - V_{anhidro}}{V_{sat}} \right) \times \left(\frac{100}{0,9 \times \rho_0} \right)$	(3)	Fuentes (2000)
$\alpha_i = \left(\frac{i_{sat} - i_{ini}}{i_{sat}} \right) \times \left(\frac{100}{PSF - CH_{ini}} \right)$	(4)	Fuentes (2000)
$\beta_i = \left(\frac{i_{sat} - i_{anhidro}}{i_{anhidro}} \right) \times \left(\frac{100}{PSF} \right)$	(5)	Sotomayor <i>et al.</i> (2020a)
$\alpha_V = \alpha_R + \alpha_T$	(6)	Esta investigación
$\beta_V = \beta_R + \beta_T$	(7)	Esta investigación
Símbolos	Subíndices	
CH = Contenido de humedad (%)	Anhidro = Estado de humedad anhidro	
ρ_0 = Densidad básica (kg m-3)	Sat = Estado de humedad saturado	
P = Peso (kg)	Ini = Estado de humedad inicial	
V = Volumen (m3)	max = Máximo	
PSF = Punto de saturación de la fibra (%)	i = Dimensiones en R y/o T	
α = Coeficiente de higróexpansión (%/%)	R = Radial	
β = Coeficiente de higrócontracción (%/%)	T = Tangencial	
	V = Volumétrico	

Diseño experimental

La unidad experimental consistió en madera de ocho especies: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia*. Las variables de respuesta fueron: los coeficientes de higoexpansión y de higocontracción radial y tangencial. Se calcularon las relaciones de anisotropía entre las direcciones tangencial y radial de los coeficientes de higoexpansión e higocontracción. Para cada muestra y para las relaciones de anisotropía se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \mu$).

Se evaluaron correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y potencia ($y = ax^b$) y se determinaron los coeficientes de determinación (R^2) de las variables de respuesta en función de la densidad básica. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.* (2016): correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con datos de la bibliografía adaptados de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b).

Resultados y discusión

Contenido de humedad inicial

Para las ocho maderas, los valores promedio del contenido de humedad inicial fluctuaron entre un mínimo de 8,1 % (*D. palo-escrito*) y un máximo de 9,7 % (*F. mexicana*) y su variación entre especies refleja un coeficiente de variación del 6 % (Tabla 2). Al interior de cada especie, el contenido de humedad varió desde 6 % (*F. mexicana*) hasta 17 % (*T. donnell-smithii*) (Tabla 32). El contenido de humedad inicial es calculado con la Ec. (1) a partir de mediciones directas del peso inicial y el peso en estado anhidro.

Densidad básica

Las magnitudes promedio de la densidad básica de la madera para cada una de las especies variaron en el intervalo que va desde 388 kg m^{-3} (*C. lindleyi*) hasta 573 kg m^{-3} (*G. ulmifolia*) (Tabla 2) y muestran un coeficiente de variación entre especies de 12 % (Tabla 2). En comparación con los datos reportados por Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) con un rango que va desde un mínimo de 317 kg m^{-3} (*S. parahibum*) hasta un máximo de 1060 kg m^{-3} (*Q. skinneri*) (Anexo), la amplitud del intervalo de valores de la densidad básica de la presente investigación es menor. Sin embargo, el coeficiente de variación de 22 % es solamente 4 % menor al calculado para los datos bibliográficos mencionados, el cual es de 26 %. La densidad básica es calculada con la Ec. (2) a partir de mediciones directas del peso anhidro y el volumen saturado.

Los coeficientes de variación, que representan la variabilidad al interior de cada especie, van desde un mínimo de 4 % (*F. mexicana*) hasta un máximo de 19 % (*C. odorata*) (Tabla 32). En este mismo sentido, Sotomayor y Ramírez (2013), a partir del análisis de una base de datos de las características higroscópicas de 134 especies mexicanas, así como De Almeida *et al.* (2017) en su estudio de 15 maderas brasileñas, perciben incompleto el enfoque tradicional de calificar la calidad de una especie o las características de una madera, únicamente en relación con su densidad básica. De aquí resulta la utilidad incorporar sus características higroscópicas para una caracterización integral como material de ingeniería.

Tabla 32. Densidad básica y contenido de humedad inicial.

Especies		ρ_0	CH_{ini}
		(kg m^{-3})	(%)
<i>Cupressus lindleyi</i>	μ	388	8,7
	CV	(7)	(7)
<i>Cedrela odorata</i>	μ	439	8,9
	CV	(19)	(9)
<i>Swietenia macrophylla</i>	μ	460	8,7
	CV	(7)	(8)
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	μ	522	8,4

	CV	(5)	(17)
<i>Fraxinus uhdei</i>	μ	528	9,5
	CV	(6)	(14)
<i>Fagus mexicana</i>	μ	515	9,7
	CV	(4)	(6)
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	μ	537	8,1
	CV	(13)	(10)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	μ	573	9,0
	CV	(7)	(11)
ρ_0 = Densidad básica; CH_{ini} = Contenido de humedad inicial; μ = Media; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.			

Higroexpansiones

La humedad penetra en la madera por la atracción de las moléculas de agua hacia los hidroxilos de sus componentes químicos, principalmente, la celulosa. Como resultado, estos hidroxilos forman una capa mono molecular de agua con fuertes enlaces de hidrógeno. La formación de esta capa hace que se separen las cadenas de moléculas de celulosa en las regiones amorfas y entre los cristalitos de las microfibrillas, de modo que la madera comienza a expandirse. Bajo el efecto de las fuerzas de atracción secundarias, más moléculas de agua entran en la madera y forman una capa poli molecular.

Adicionalmente, otras moléculas pueden entrar por condensación de capilaridad en los huecos de la pared celular. Después de la saturación de las paredes, el agua líquida también entra en las cavidades celulares (Sotomayor *et al.*, 2020b). Por lo tanto, existen dos niveles de masa de agua en la madera: el agua contenida en las paredes celulares y el agua libre que ocupa las cavidades intercelulares. La condición en la cual las paredes están saturadas pero las cavidades están vacías se llama punto de saturación de la fibra (Berry y Roderick, 2005), en este estado el fenómeno de la variación dimensional ocasionada por la fluctuación del contenido de humedad termina.

El coeficiente de higoexpansión radial (Ec. 4) varía desde un mínimo de 0,20 %/% (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 0,30 %/% (*D. palo-escrito*) (Tabla 33). Su variabilidad entre especies se explica por un coeficiente de variación de 14 %. Por su parte, el coeficiente de higoexpansión tangencial (Ec. 4) fluctúa desde un mínimo de 0,22 %/% (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 0,41 %/% (*F. mexicana*) con un coeficiente de variación de 21 %. Estas magnitudes se ubican al interior del intervalo reportado por Torelli y Gorišek (1995) para 43 especies mexicanas.

El coeficiente de higoexpansión volumétrica, calculado con la Ec. (7) adiciona aritméticamente los resultados de los coeficientes radial y tangencial. Así, el valor mínimo de 0,42 %/% corresponde a *C. lindleyi* y el máximo de 0,68 %/% corresponde a *D. palo-escrito*. Su coeficiente de variabilidad es de 16 %, valor intermedio entre los coeficientes de higoexpansión radial y tangencial.

Tabla 33. Higoexpansiones, higocontracciones y relaciones de anisotropía.

	Higoexpansión				Higocontracción			
Especie	α_R	α_T	α_V	α_T/α_R	β_R	β_T	β_V	β_T/β_R
	(%/%))	(%/%))	(%/%))	-	(%/%))	(%/%))	(%/%))	-
<i>Cupressus lindleyi</i>	0,20	0,22	0,42	1,10	0,15	0,15	0,30	1,05
<i>Cedrela odorata</i>	0,21	0,28	0,49	1,34	0,18	0,22	0,39	1,25
<i>Swietenia macrophylla</i>	0,21	0,28	0,50	1,34	0,17	0,22	0,40	1,31
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	0,22	0,31	0,52	1,42	0,20	0,26	0,46	1,27
<i>Fraxinus uhdei</i>	0,25	0,39	0,64	1,53	0,22	0,25	0,47	1,14
<i>Fagus mexicana</i>	0,22	0,41	0,64	1,84	0,18	0,27	0,45	1,50
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	0,30	0,38	0,68	1,28	0,16	0,30	0,46	1,85
<i>Guazuma ulmifolia</i>	0,23	0,39	0,61	1,71	0,20	0,31	0,50	1,54
μ	0,23	0,33	0,56	1,44	0,18	0,25	0,43	1,36
CV	(14)	(21)	(16)	(17)	(13)	(20)	(15)	(19)
α = Coeficiente de higoexpansión; β = Coeficiente de higocontracción; R = Radial; T = Tangencial;								

Estos resultados son del mismo orden que los reportados en la bibliografía: Haag *et al.* (2020) utiliza la técnica de inmersión en agua y reporta para madera de *Cedrelinga cateniformis* ($\rho_0 = 520 \text{ kg m}^{-3}$) un coeficiente de higróexpansión radial de 0,15 %/% y tangencial de 0,28 %/%. Utilizando la misma técnica, Sotomayor (2017) reporta para *Gyrocarpus americanus* un coeficiente de higróexpansión radial de 0,10 %/% y tangencial de 0,001 %. Por su parte, Sotomayor *et al.* (2020b) con un procedimiento similar al aplicado en esta investigación, reportan coeficientes de higróexpansión radiales para *Spathodea campanulata* ($\rho_0 = 269 \text{ kg m}^{-3}$) de 0,30 %/%, para *Fraxinus americana* ($\rho_0 = 534 \text{ kg m}^{-3}$) de 0,23 %/% y para *Albizia plurijuga* ($\rho_0 = 697 \text{ kg m}^{-3}$) de 0,34 %/%.

Las magnitudes de las higróexpansiones en la dirección longitudinal de la madera son del orden de 0,1 % (Arzola-Villegas *et al.*, 2019) y su determinación experimental es difícil de lograr (Derome, 2013, Sotomayor, 2016). Usualmente no se reportan resultados de este coeficiente y se considera un factor que no afecta de manera significativa la higróexpansión volumétrica (Liu *et al.*, 2020).

Como resultado, el nivel de estabilidad dimensional de una especie de madera, se evalúa con las higróexpansiones lineales (radial y tangencial) y volumétrica (Tiryaki *et al.*, 2016, Fu *et al.*, 2019). Estos parámetros son útiles para caracterizar las propiedades físicas de una especie. Sin embargo, para homogeneizar resultados con respecto a la variación del contenido de humedad, es conveniente determinar los coeficientes de higróexpansión, los cuales ponderan la variación geométrica por el incremento en el contenido de humedad (Torelli y Gorišek, 1995a, Lesar *et al.*, 2011).

El coeficiente de higróexpansión radial correlaciona con la densidad básica con un coeficiente de determinación bajo (Fig. 68). Por su parte, la misma correlación calculada a partir de los datos de Torelli y Gorišek (1995a) califica como alta. En el mismo sentido, el coeficiente de higróexpansión tangencial indica una correlación alta y mayor que la calculada con datos de la bibliografía, la cual califica como media (Fig. 69).

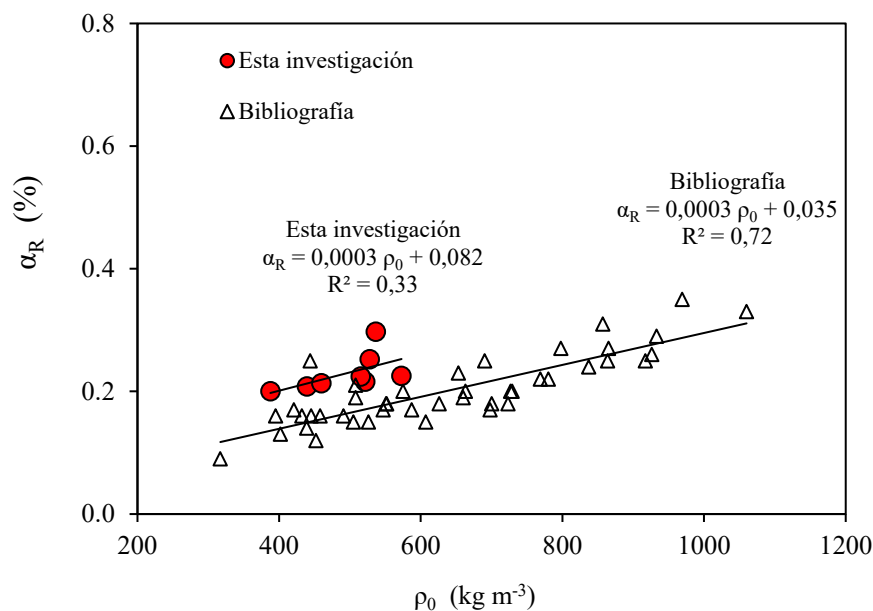


Fig. 69. Correlaciones entre higr expansi3n radial y densidad b3sica.

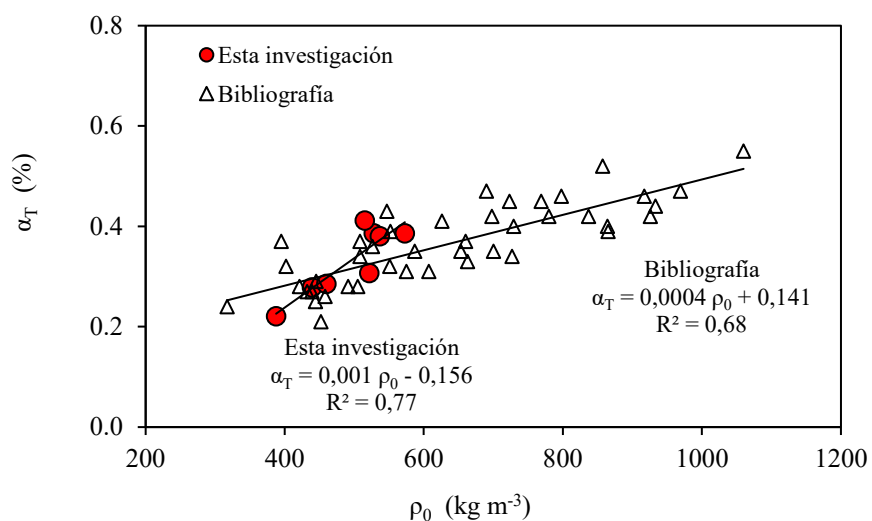


Fig. 70. Correlaciones entre higr expansi3n tangencial y densidad b3sica.

Estas tendencias son difciles de comparar con las reportadas en la literatura. Para coeficientes de higr expansi3n radial, tangencial y volum3trico, Hern3ndez (2007a) y (2007b) reporta coeficientes de determinaci3n de correlaciones lineales que califican de medio a alto para nueve maderas del Per3, con densidad b3sica entre 462 kg m⁻³ y 917 kg m⁻³. Por su parte, Shukla y Kandem (2010)

reportan para nueve maderas de Camerún densidades básicas entre 448 kg m^{-3} y 690 kg m^{-3} , correlaciones lineales de tipo $y = a + bx$ y sus coeficientes de determinación (R^2) para las higoexpansiones radial (α_R), tangencial (α_T) y volumétrica (α_V) son las siguientes: $\alpha_R = 0,005 \rho_0 + 0,078$ ($R^2 = 0,56$), $\alpha_T = 0,004 \rho_0 + 1,720$ ($R^2 = 0,44$) y $\alpha_V = 0,010 \rho_0 + 1,800$ ($R^2 = 0,54$) de donde concluyen que no existe correlaciones lineales fuertes entre la densidad básica de la madera y su higoexpansión.

En el mismo sentido, De Almeida *et al.* (2017) reportan para 15 maderas brasileñas, con densidades básicas que van desde 650 kg m^{-3} hasta 1000 kg m^{-3} , coeficientes de determinación derivados de correlaciones potencia de la forma $y = ax^b$ entre el coeficiente de higoexpansión volumétrico y la densidad básica de $R^2 = 0,10$.

Higocontracciones

El coeficiente de higocontracción radial varía entre un mínimo de $0,15 \text{ \%/\%}$ (*C. lindleyi*) y un máximo de $0,22 \text{ \%/\%}$ (*F. uhdei*) con un coeficiente de variación entre especies de $13 \text{ \%}$ (Tabla 33). En el mismo sentido, el coeficiente de higocontracción tangencial fluctuó desde un mínimo de $0,15 \text{ \%/\%}$ (*C. lindleyi*) hasta un máximo de $0,31 \text{ \%/\%}$ (*G. ulmifolia*) con un coeficiente de variación entre especies de $20 \text{ \%}$.

El coeficiente de higocontracción volumétrica, calculado con la Ec. (6), adiciona aritméticamente los resultados de los coeficientes radial y tangencial. Así, el valor mínimo de $0,30 \text{ \%/\%}$ corresponde a *C. lindleyi* y el máximo de $0,50 \text{ \%/\%}$ corresponde a *G. ulmifolia*. Su coeficiente de variabilidad es de $16 \text{ \%}$, valor intermedio entre los coeficientes de higoexpansión radial y tangencial.

En la dirección radial, el coeficiente de higocontracción correlaciona con el coeficiente de higoexpansión con un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0,73$ ($\beta_R = 1,239 \alpha_R + 0,088$). Para la dirección tangencial, esta correlación es alta $R^2 = 0,76$ ($\beta_T = 0,631 \alpha_T + 0,038$). Como resultado, los coeficientes volumétricos de higoexpansión e higocontracción indican un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0,70$ ($\beta_V = 0,616 \alpha_V + 0,085$).

Estos resultados son similares a los estimados a partir de datos de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) cuyas correlaciones y coeficientes de determinación son: $\beta_R = 0,975 \alpha_R - 0,008$, con $R^2 = 0,67$ (medio); $\beta_T = 1,188 \alpha_T - 0,048$ con $R^2 = 0,78$ (alto); y $\beta_V = 1,166 \alpha_V - 0,086$ con $R^2 = 0,79$ (alto).

Para los datos calculados a partir de estos autores, la correlación del coeficiente de higocontracción radial en función de la densidad básica de la madera califica como alta. En contraste, los resultados de la presente investigación indican un coeficiente de determinación medio (Fig. 70). Para el caso del coeficiente de higocontracción tangencial, los coeficientes de determinación correspondientes a la presente investigación y a los datos de la bibliografía califican como muy altos (Fig. 71).

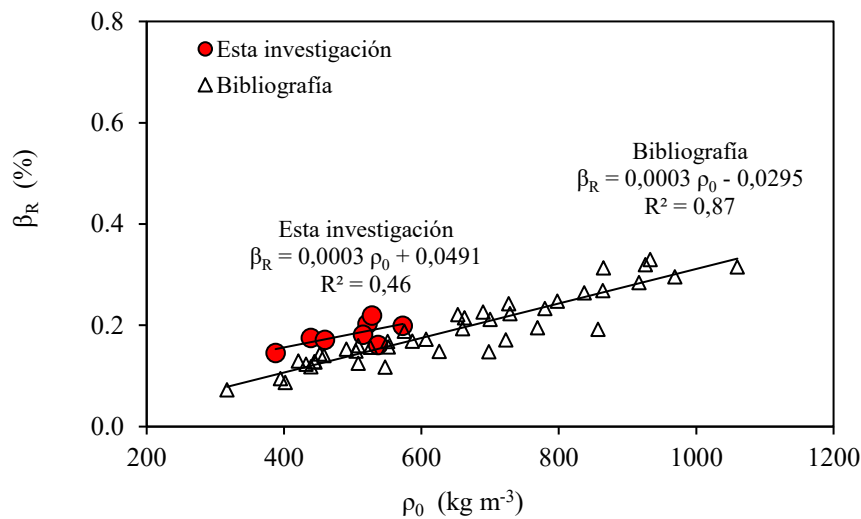


Fig. 71. Correlaciones entre higocontracción radial y densidad básica.

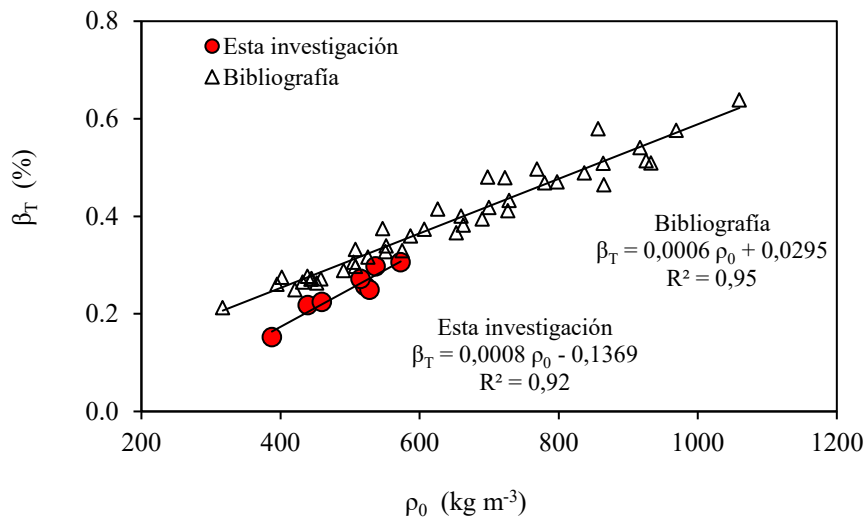


Fig. 72. Correlaciones entre higrócontracción tangencial y densidad básica.

Dado que las regresiones se derivan de mediciones en muestras comunes, realizadas en las mismas condiciones experimentales y con el mismo aparato, el error de las mediciones, introducido en la predicción del parámetro dependiente y la precisión del parámetro medido está incluido en el valor del coeficiente de determinación (Hanhijärvi *et al.*, 2005). Como corolario, los coeficientes de determinación alcanzados muestran homogeneidad y coherencia en los resultados.

Los coeficientes de higróexpansión volumétricos son en promedio mayores 23 % respecto a los coeficientes de higrócontracción volumétricos (Tabla 33). Los coeficientes de higróexpansión y de higrócontracción en la dirección radial aumentan a medida que la densidad básica de la madera se incrementa. Este resultado coincide con la información reportada en la bibliografía.

Relaciones de anisotropía

La relación de anisotropía de las higróexpansiones (α_T/α_R) varía desde un mínimo de 1,10 (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 1,84 (*F. mexicana*) con un coeficiente de variación de 16 % (Tabla 33). Comparativamente, Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) reportan relaciones de anisotropía de 1,9 y un CV de 19 %. A partir de los resultados de estos autores y listados en el anexo, la Figura

72 presenta la correlación entre relación de anisotropía de higoexpansión y densidad básica, la cual tiene una pendiente ligeramente negativa. En cambio, la correlación calculada con los resultados de la presente investigación señala una pendiente positiva. Además, el coeficiente de determinación es cinco veces más grande respecto al calculado con datos de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b).

La relación de anisotropía de las higocontracciones (β_T/β_R) varían desde un mínimo de 1,05 (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 1,85 (*D. palo-escrito*) con un coeficiente de variación de 19 % (Tabla 33). De acuerdo a la clasificación propuesta por Sotomayor y Ramírez (2013) las relaciones de anisotropía para las higocontracciones son: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii* y *F. uhdei* muy baja; *F. mexicana* y *G. ulmifolia* baja; y *D. palo-escrito* media. De manera similar a la anisotropía de las contracciones, a partir de los resultados de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b) y listados en el anexo, la Figura 73 presenta la correlación entre relación de anisotropía de higocontracción y densidad básica, la cual tiene una pendiente ligeramente negativa. En cambio, la correlación calculada con los resultados de la presente investigación indica una pendiente positiva. En este caso, el coeficiente de determinación es cuatro veces más grande respecto al calculado con datos de Torelli y Gorišek (1995a) y (1995b).

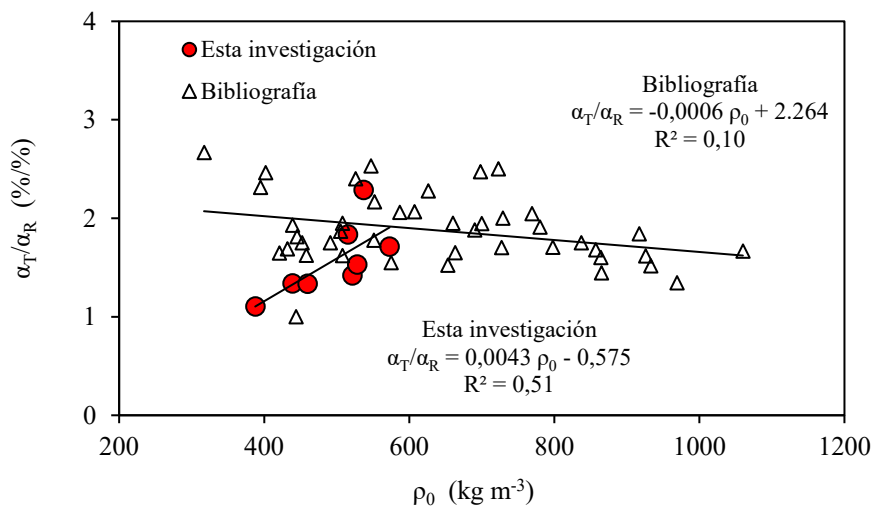


Fig. 73. Correlaciones entre relación de anisotropía de higoexpansión y densidad básica.

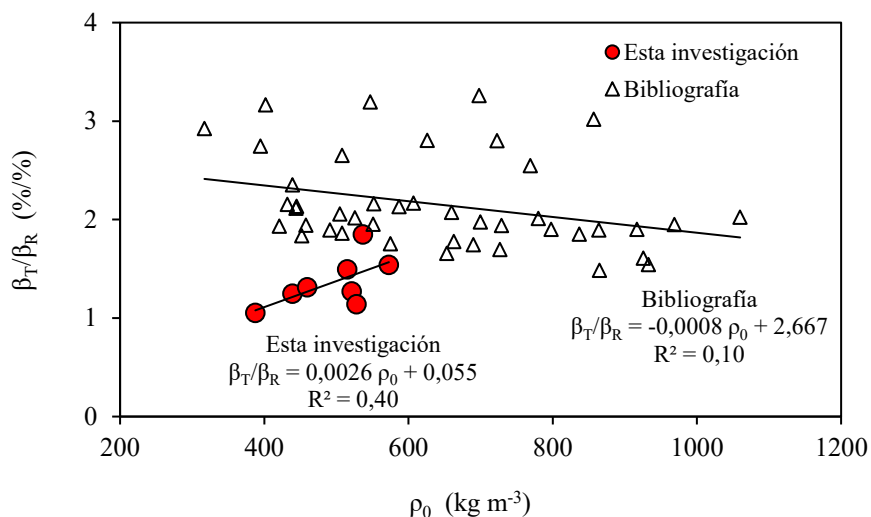


Fig. 74. Correlaciones entre relación de anisotropía de higocontracción y densidad básica.

Anexo. Densidad básica, coeficiente de higoexpansión, coeficiente de higocontracción y sus relaciones de anisotropía de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek (1995a y 1995b).

		Higroexpansión			Higrocontracción		
	ρ_0	α_R	α_T	α_T/α_R	β_R	β_T	β_T/β_R
Especies	(kg m ⁻³)	(%%/%)		-	(%%/%)		-
<i>Alchornea latifolia</i>	402	0,13	0,32	2,5	0,09	0,27	3,2
<i>Ampelocera hottlei</i>	690	0,25	0,47	1,9	0,23	0,39	1,7
<i>Aspidosperma megalocarpun</i>	798	0,27	0,46	1,7	0,25	0,47	1,9
<i>Blepharidium mexicanum</i>	626	0,18	0,41	2,3	0,15	0,42	2,8
<i>Brosimum allicastrum</i>	865	0,27	0,39	1,4	0,31	0,47	1,5
<i>Bursera simaruba</i>	452	0,12	0,21	1,8	0,14	0,26	1,8
<i>Calophyllum brasiliense</i>	575	0,20	0,31	1,6	0,19	0,33	1,8
<i>Cordia alliodora</i>	552	0,18	0,39	2,2	0,16	0,34	2,2
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	395	0,16	0,37	2,3	0,09	0,26	2,7
<i>Dendropanax arboreus</i>	421	0,17	0,28	1,6	0,13	0,25	1,9
<i>Dialium guianense</i>	917	0,25	0,46	1,8	0,28	0,54	1,9

<i>Dipholis stevensonii</i>	969	0,35	0,47	1,3	0,30	0,58	1,9
<i>Guarea glabra</i>	587	0,17	0,35	2,1	0,17	0,36	2,1
<i>Guatteria anomala</i>	432	0,16	0,27	1,7	0,12	0,27	2,2
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	837	0,24	0,42	1,8	0,26	0,49	1,9
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	729	0,20	0,40	2,0	0,22	0,43	1,9
<i>Manilkara zapota</i>	926	0,26	0,42	1,6	0,32	0,51	1,6
<i>Misanteca pekii</i>	653	0,23	0,35	1,5	0,22	0,37	1,7
<i>Nectandra sp.</i>	508	0,21	0,34	1,6	0,16	0,30	1,9
<i>Pachica acuática</i>	526	0,15	0,36	2,4	0,16	0,32	2,0
<i>Pithecellobium arboreum</i>	700	0,18	0,35	1,9	0,21	0,42	2,0
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	505	0,15	0,28	1,9	0,15	0,31	2,1
<i>Platymiscium yucatanum</i>	727	0,20	0,34	1,7	0,24	0,41	1,7
<i>Poulsenia armata</i>	445	0,16	0,29	1,8	0,13	0,27	2,1
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	444	0,25	0,25	1,0	0,13	0,27	2,1
<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i>	723	0,18	0,45	2,5	0,17	0,48	2,8
<i>Pterocarpus hayesii</i>	508	0,19	0,37	1,9	0,13	0,33	2,7
<i>Quercus anglohondurensis</i>	857	0,31	0,52	1,7	0,19	0,58	3,0
<i>Quercus skinneri</i>	1060	0,33	0,55	1,7	0,32	0,64	2,0
<i>Schizolobium parahibum</i>	317	0,09	0,24	2,7	0,07	0,21	2,9
<i>Sebastiania longicuspis</i>	607	0,15	0,31	2,1	0,17	0,37	2,2
<i>Sickingia salvadorensis</i>	769	0,22	0,45	2,0	0,20	0,50	2,5
<i>Simarouba glauca</i>	439	0,14	0,27	1,9	0,12	0,28	2,4
<i>Spondias mombin</i>	491	0,16	0,28	1,8	0,15	0,29	1,9
<i>Swartzia cubensis</i>	933	0,29	0,44	1,5	0,33	0,51	1,5
<i>Sweetia panamensis</i>	864	0,25	0,40	1,6	0,27	0,51	1,9
<i>Swietenia macrophylla</i>	458	0,16	0,26	1,6	0,14	0,27	1,9
<i>Talauma mexicana</i>	551	0,18	0,32	1,8	0,17	0,33	2,0
<i>Terminalia amazonia</i>	663	0,20	0,33	1,7	0,21	0,38	1,8
<i>Vatairea lundelli</i>	780	0,22	0,42	1,9	0,23	0,47	2,0
<i>Vitex gaumeri</i>	660	0,19	0,37	1,9	0,19	0,40	2,1

<i>Vochysia hondurensis</i>	547	0,17	0,43	2,5	0,12	0,37	3,2
<i>Zuelania guidonia</i>	698	0,17	0,42	2,5	0,15	0,48	3,3
ρ_0 = Densidad básica; α = Coeficiente de higr expansi3n; β = Coeficiente de higr contracci3n; R = Radial; T = Tangencial.							

4.12. Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar la resistividad eléctrica en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* empleando probetas de pequeñas dimensiones. Se prepararon 20 probetas de madera sólida de cada una de las especies con dimensiones de 20 mm × 20 mm × 20 mm en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. Se determinaron la densidad y el contenido de humedad de la madera. Se realizaron pruebas de resistividad eléctrica midiendo la resistencia eléctrica empleando corriente continua con una tensión de prueba de 1000 voltios. Los principales resultados son: las magnitudes de las resistencias longitudinales medidas en las tres maderas son similares a las de la madera reportadas en la literatura. Los valores de las resistividades muestran diferencias entre las direcciones de anisotropía de la madera y entre las especies estudiadas.

Palabras clave: densidad de la madera, contenido de humedad de la madera, resistencia eléctrica, corriente continua, anisotropía.

Abstract

The objective of the research was to determine the electrical resistivity in the radial, tangential and longitudinal directions of the wood of *P. pseudostrobus*, *T. rosea* and *Q. scytophylla* using small-sized probes. Twenty solid wood specimens were prepared for each of the species with dimensions of 20 mm × 20 mm × 20 mm in the radial, tangential and longitudinal directions, respectively. The density and moisture content of the wood were determined. Electrical resistivity tests were performed by measuring electrical resistance using direct current with a test voltage of 1000 volts. The main results are: the magnitudes of the longitudinal resistances measured in the three woods are similar to those of the wood reported in the literature. The resistivity values show differences between the anisotropy directions of the wood and between the species studied.

Keywords: wood density, wood moisture content, electrical resistance, direct current, anisotropy.

Introducción

La resistividad eléctrica de la madera, también denominada resistencia eléctrica específica, es una propiedad intrínseca del material y se define como la resistencia óhmica medida en una probeta con un área de sección transversal y una distancia definida entre electrodos y/o posiciones de aplicación de voltaje (Hafsa *et al.*, 2021). De tal forma, que para determinar la resistividad eléctrica de la madera es necesario medir su resistencia eléctrica.

En función de los objetivos específicos de cada investigación, la literatura sobre la resistividad eléctrica de la madera reporta valores de resistencia eléctrica medidos en diferentes especies, direcciones anisotrópicas y con diferentes protocolos experimentales. Dado que la resistencia eléctrica es una característica extensiva del material, la determinación de su magnitud y el cálculo posterior de la resistividad varían ampliamente entre investigaciones.

El contenido de humedad, la especie, la anisotropía, la temperatura y la densidad son factores inherentes a la madera que afectan la determinación de su resistividad eléctrica. En el mismo sentido, las variables experimentales que modifican la medición del flujo eléctrico en la madera son las dimensiones y forma de las probetas, la magnitud y duración del voltaje aplicado, el tipo y la configuración de los electrodos, la presión de contacto, así como los efectos electrolíticos en la pared celular del plano leñoso (Casans *et al.*, 2019; Hafsa *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2021).

De esta manera, las investigaciones donde se aplica un voltaje a una pieza de madera están principalmente orientadas hacia el estudio de alteraciones del plano leñoso. Por ejemplo, se analiza la variación de la resistencia eléctrica en la madera para varios estados de su deterioro biológico (Gao *et al.*, 2019). A medida que el deterioro de una pieza de madera está más avanzado y su estructura anatómica, así como su composición química se modifican, la resistencia eléctrica disminuye. Este enfoque se aplica para medir la vitalidad de árboles en pie (Losso *et al.*, 2020), el efecto de la temperatura en la resistividad de trozas (Luo *et al.*, 2019), el deterioro de la madera controlado en condiciones de laboratorio (Kirker *et al.*, 2016), la variación de la resistencia eléctrica

en madera modificada (van Blokland y Adamopoulos, 2022) y la evaluación del estado tecnológico de madera arqueológica (Fediuk *et al.*, 20212).

La escala de observación para el estudio de las propiedades eléctricas de la madera ha sido objeto de estudio, desde la tomografía de árboles en pie (Ganthaler *et al.*, 2019), pasando por probetas de pequeñas dimensiones (Otten *et al.*, 2017), hasta nivel de la pared celular (Zelinka *et al.*, 2016). Para fines prácticos, cada autor mide la resistencia eléctrica en probetas con dimensiones apropiadas de acuerdo con los objetivos de sus investigaciones. Otro enfoque de aplicación de las propiedades eléctricas de la madera es su estudio como un biomaterial sensible y conceptualizado como un sustrato conductor para dispositivos electrónicos, que podrían ser una alternativa renovable a los sustratos plásticos tradicionalmente utilizados (Guo *et al.*, 2018; Zhang y Shen, 2019).

El mecanismo de conducción eléctrica en la madera depende de la presencia de iones como portadores de carga en la pared celular, y asociada a las propiedades de porosidad del plano leñoso, lo que resulta en un mecanismo de percolación a través del cual se produce el movimiento de iones (Zelinka *et al.*, 2016; Fredriksson *et al.*, 2021). Así, la estructura anatómica (Jiang *et al.*, 2003) y su composición química (Jakes *et al.*, 2013;) juegan igualmente un papel importante en los fenómenos de transferencia del flujo eléctrico.

Una de las aplicaciones más importantes de la resistencia eléctrica de la madera es su correlación con su contenido de humedad (Fernández-Golfín *et al.*, 2012). El paradigma vigente en ciencias de la madera propone que, con la disminución del contenido de agua presente en la madera, su resistividad aumenta y, por lo tanto, la madera seca se convierte en un material aislante (Martin y Günther, 2013; Gao *et al.*, 2018). Este es el principio físico para el diseño de aparatos comerciales para estimar el contenido de humedad en una pieza de madera. De tal forma que en la literatura se proponen correlaciones entre estas dos variables (Xu *et al.*, 2019). No obstante, estos modelos son únicamente de aplicación práctica para las especies y condiciones experimentales en las cuales fueron determinadas.

A pesar de su importancia tecnológica, en la literatura mexicana no se reportan valores de la resistividad eléctrica de especies endémicas de madera. El objetivo de la investigación fue determinar la resistividad eléctrica en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* empleando probetas de pequeñas dimensiones.

Materiales y métodos

Se prepararon 20 probetas de madera sólida de cada una de las especies *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. Sus dimensiones fueron 20 mm × 20 mm × 20 mm en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20 °C y humedad relativa del aire de 65 %, hasta que su peso fue constante. La densidad de la madera se determinó con la relación peso/volumen de la probeta al momento del ensayo. Después de las pruebas de resistividad eléctrica, el contenido de humedad de la madera se determinó con la diferencia de pesos al momento del ensayo y en el estado anhidro.

Las pruebas de resistividad eléctrica siguieron el siguiente protocolo: cada probeta se posicionó entre los soportes y superficies de contacto del dispositivo fabricado para la presente investigación (Figura 75). Para lograr un contacto uniforme entre la madera y las placas de cobre de 0,9 mm de espesor con resistividad eléctrica de $1,72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, el dispositivo aplica una presión suficiente para asegurar un flujo estable de corriente directa según la dirección y acomodo de la probeta.

Para cada dirección de anisotropía de la madera, se midió la resistencia eléctrica con un aparato marca Fluke, modelo 1520, empleando una tensión de prueba de 1000 voltios. En cada prueba se realizaron tres mediciones; el promedio se consideró la resistencia medida y se calculó la resistividad eléctrica con la fórmula (21).

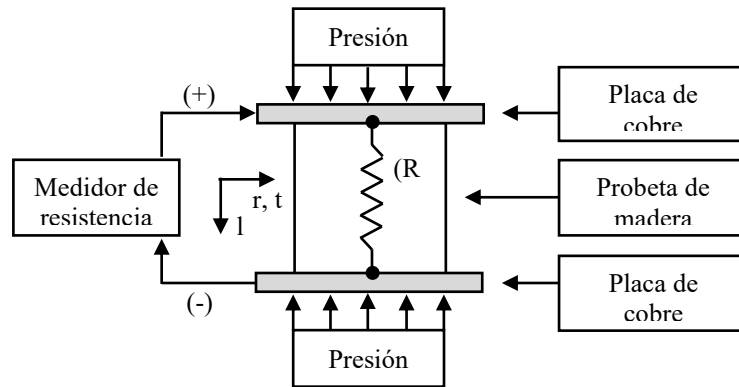


Fig. 75 Configuración de las pruebas de resistividad eléctrica. R = Resistencia eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = dirección longitudinal.

$$\rho = R \times \left(\frac{A}{l} \right) \quad (21)$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica ($\Omega \text{ m}$)

R = Resistencia eléctrica (Ω)

A = Área transversal a la dirección del flujo eléctrico (m^2)

l = Distancia entre electrodos o puntos de aplicación del voltaje (m)

En lo subsecuente, al símbolo de la resistividad eléctrica ρ se le asocian los subíndices r, t y l para explicitar que la dirección del flujo eléctrico se midió en las direcciones radial, tangencial y longitudinal respectivamente: ρ_r , ρ_t , ρ_l .

Diseño experimental

Para cada especie (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*), las resistividades se calcularon con la fórmula (1) y se agruparon en cuatro muestras: resistividad radial (ρ_r), resistividad tangencial (ρ_t), resistividad promedio radial-tangencial ($\text{Prom } \rho_r + \rho_t = [(\rho_r + \rho_t)/2]$) y resistividad longitudinal (ρ_l). Para cada especie, los datos se compararon en pares: ρ_r versus ρ_t y $\text{Prom } \rho_r + \rho_t$ versus ρ_l .

Se realizaron pruebas de normalidad de las distribuciones en cada una de las tres direcciones de anisotropía. El criterio de demarcación para considerar una distribución normal fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo $[-2 < SE, AE < +2]$. Para estos parámetros y para la densidad (ρ_{CH}) y el contenido de humedad (CH) se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$).

Se realizaron pruebas de verificación y análisis de varianza con la hipótesis nula $H_0: \sigma_1 = \sigma_2$ donde σ es la desviación estándar y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. El criterio de demarcación fueron valores de $P(\alpha = 0,05) \geq 0,05$, para considerar que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95% de confianza.

Cuando no se cumplió con este criterio de demarcación, se realizaron pruebas de diferencias de medianas (x) de Kruskal-Wallis (K-W) con la hipótesis nula: $H_0: x_1 = x_2$ donde x es la mediana y los subíndices 1 y 2 se refieren a las muestras contrastadas. Se realizaron pruebas de rangos múltiples (RM) con el criterio de demarcación de que existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de x .

Resultados y discusión

Los valores de la densidad son comparables con los reportados en el Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas (Sotomayor, 2015). En el mismo sentido, sus coeficientes de variación son aceptables para especies mexicanas.

El contenido de humedad de la madera varía en un intervalo de 3,9 % (máximo *Q. scytophylla* 14,4 %, mínimo *T. rosea* 10,6 %), de tal forma que se puede considerar a la madera en estado seco y con un contenido de humedad similar al alcanzado en condiciones interiores de servicio de piezas de madera. Sin embargo, los coeficientes de variación son grandes, particularmente los de *T. rosea* ($CH = 10,6$, $CV = 28,8$ %). Dado que la resistencia eléctrica de la madera aumenta de manera exponencial cuando su contenido de humedad disminuye (Fernández-Golfín et al., 2012; Xu et al., 2019), este parámetro contribuyó en la variación de los resultados.

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica de la madera es una característica extensiva que depende de la cantidad de materia y/o de las dimensiones del espécimen en estudio. De tal forma que es difícil comparar directamente las magnitudes reportadas en la literatura. No obstante, las magnitudes de las resistencias longitudinales medidas en *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son similares a las de la madera sólida de *Picea abies* reportadas por Slávik *et al.* (2019), quienes utilizaron un sistema de circuito simple de resistencia-condensador, adaptado para probetas de pequeñas dimensiones, con contenidos de humedad en el rango entre 10 % y 15 % y midieron las resistencias para distancias entre electrodos de 20 mm entre puntos de aplicación de la corriente eléctrica (condiciones similares a las de la presente investigación).

En el mismo contexto Xu *et al.* (2019) estudiaron la variación de la resistencia eléctrica en la dirección longitudinal en madera de *Liriodendron tulipifera* en función de su contenido de humedad y reportan una correlación exponencial ($y = a \cdot x^b$) entre estas dos variables. Los valores promedio de las resistencias longitudinales de las tres maderas, se posicionan relativamente bien respecto a los datos de Slávik *et al.* (2019) y Xu *et al.* (2019) (Figura 76), obtenidos con probetas de pequeñas dimensiones y en condiciones experimentales similares a las de la presente investigación

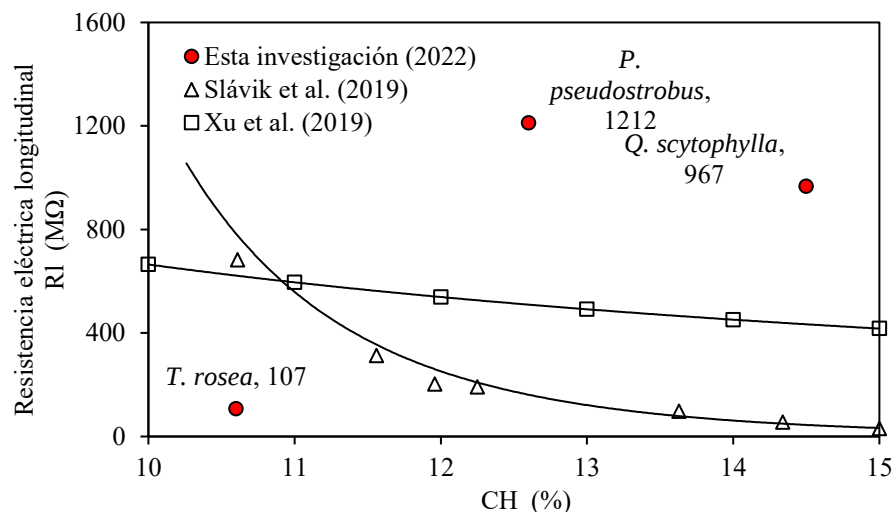


Fig. 76 Posicionamiento de la resistencia eléctrica de la madera medida en la dirección longitudinal (Esta investigación, 2022) en comparación con datos de Slávik *et al.* (2019) y Xu *et al.* (2019).

Por su parte, Hwang *et al.* (2021) implementaron un experimento en el cual utilizan placas de contacto entre el circuito que suministra la corriente eléctrica y la probeta con dimensiones de su sección transversal semejante a las de la presente investigación. Igualmente, estos autores emplearon un medidor de resistencia de corriente directa, es decir, del mismo tipo del utilizado en la presente investigación. Si bien sus valores de resistencia eléctrica no son comparables con los obtenidos en la presente investigación, las mediciones de estos autores experimentan con el empleo de placas metálicas cuyas superficies están en contacto estrecho con la probeta y así medir la resistencia de la madera a un flujo eléctrico de corriente directa.

Resistividad eléctrica

Los resultados de la resistividad eléctrica en las direcciones de anisotropía radial, tangencial y longitudinal de las maderas *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* muestran valores del sesgo estandarizado y apuntamiento estandarizado al interior del intervalo $[-2 < SE, AE < +2]$, corolarios que indican distribuciones normales (Tabla 34). Por su parte, la prueba de verificación de varianza entre las resistividades radiales y tangenciales revela que existe una diferencia significativa ($P(\alpha = 0,05) \geq 2$) entre ellas para las tres especies. Sin embargo, la prueba de verificación de varianza entre las resistencias longitudinal y el promedio medido de las resistencias radial y tangencial demuestra que para *P. pseudostrobus* y *T. rosea* existe una diferencia significativa ($P(\alpha = 0,05) \leq 2$), pero no existe diferencia para *Q. scytophylla*.

Tabla 34. Resultados del análisis estadístico de la resistividad eléctrica.

	SE	AE	Ver-Var	Anova	K-W	RM	
	<i>Pinus pseudostrobus</i>						
pr	-1,0210	-0,6412	0,6057*	0,8037*	-	x	
pt	-0,4790	-1,1230	-	-	-	x	
pl	0,7292	0,2677	0,0214#	-	<0,0001#	x	
Prom pr+pt	-0,7477	-1,0440	-	-	-		x
	<i>Tabebuia rosea</i>						
pr	0,8191	-0,0487	0,2526*	0,0015#	-	x	

ρt	0,4241	-0,6032	-	-	-		x
ρl	1,0290	1,6150	<0,0001#	-	<0,0001#	x	
Prom $\rho r + \rho t$	0,4672	-0,3213	-	-	-		x
<i>Quercus scytophylla</i>							
ρr	-0,4681	-1,4140	0,0897*	0,0148#	-	x	
ρt	0,0839	0,5448	-	-	-		x
ρl	1,3480	-0,1244	0,2286*	<0,0001#	-	x	
Prom $\rho r + \rho t$	-0,0044	-1,0420	-	-	-		x
ρ = Resistividad eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = Dirección longitudinal; Prom $\rho r + \rho t$ = Resistencia transversal promedio; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-Var: Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; K-W = Prueba de Kruskal-Wallis; RM = Prueba de rangos múltiples; * = No existe diferencia significativa ($P(\alpha = 0,05) > 0,05$); # = Existe diferencia significativa ($P(\alpha = 0,05) < 0,05$).							

Por su parte, las pruebas de análisis de varianza entre resistividades radiales y tangenciales indican diferencias significativas para las tres maderas. Para el caso de las resistividades promedio versus las longitudinales, solamente para *Q. scytophylla* no existe una diferencia significativa entre estas dos variables. Para las comparaciones restantes, el análisis de varianza y las pruebas de Kruskal-Wallis indican diferencias significativas. En el mismo contexto, las pruebas de rangos múltiples distinguen los valores medios de las resistividades radiales y tangenciales, así como los promedios radial y tangencial versus longitudinal. Caso diferente son las resistividades radiales y tangenciales de *P. pseudostrobus* que se agrupan sin diferencias significativa.

Los valores de las resistividades muestran diferencias entre las direcciones de anisotropía de la madera y entre las especies estudiadas (Tabla 35). Asimismo, los coeficientes de variación son altos comparativamente con otras características físicas de la madera. En particular, los coeficientes de variación de la densidad (de la presente investigación) muestran valores aceptables para este parámetro al interior de una misma especie (Sotomayor, 2015).

Tabla 35. Densidad, contenido de humedad y resistividad eléctrica.

	ρ_{CH}	CH	ρ_r	ρ_t	$\left(\frac{\rho_r + \rho_t}{2}\right)$	ρ_l
	(kg m ⁻³)	(%)	(M Ω m)	(M Ω m)	(M Ω m)	(M Ω m)
<i>Pinus pseudostrobus</i>						
μ	558	12,6	45,0	46,1	45,5	24,7
σ	20	2,0	15,4	12,6	13,5	6,5
CV	(3,5)	(16,0)	(34,2)	(27,3)	(29,7)	(26,4)
<i>Tabebuia rosea</i>						
μ	557	10,6	8,8	11,9	10,3	2,2
σ	15	3,1	2,4	3,2	2,6	0,5
CV	(2,7)	(28,8)	(27,5)	(26,7)	(25,6)	(21,1)
<i>Quercus scytophylla</i>						
μ	706	14,5	56,7	66,1	61,4	19,6
σ	12	2,0	17,7	19,5	14,9	12,2
CV	(1,7)	(13,7)	(31,2)	(29,5)	(24,3)	(61,9)
ρ_{CH} = Densidad; CH = Contenido de humedad; ρ = Resistividad eléctrica; r = Dirección radial; t = Dirección tangencial; l = Dirección longitudinal; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en porciento y entre paréntesis.						

Independientemente de la magnitud de las resistividades eléctricas y de la especie en cuestión, el orden de su anisotropía es en promedio: $\rho_l / \rho_r = 0,55$; $\rho_l / \rho_t = 0,54$; (Figura 77) y si se compara la anisotropía transversal, representada por el promedio de las resistividades ρ_r y ρ_t , versus la resistividad longitudinal ρ_l , esta anisotropía transversal-longitudinal es en promedio de 0,54, valor cercano a la anisotropía ρ_l/ρ_r . Estas estimaciones son similares a las publicados por Simpson y TenWolde (2010) en el Manual de la madera editado por el Laboratorio de Productos Forestales del Servicio Forestal de los Estados Unidos: $\rho_l / \rho_r = 0,55$; $\rho_l / \rho_t = 0,50$, los cuales son aceptados como referencia en tecnología de la madera.

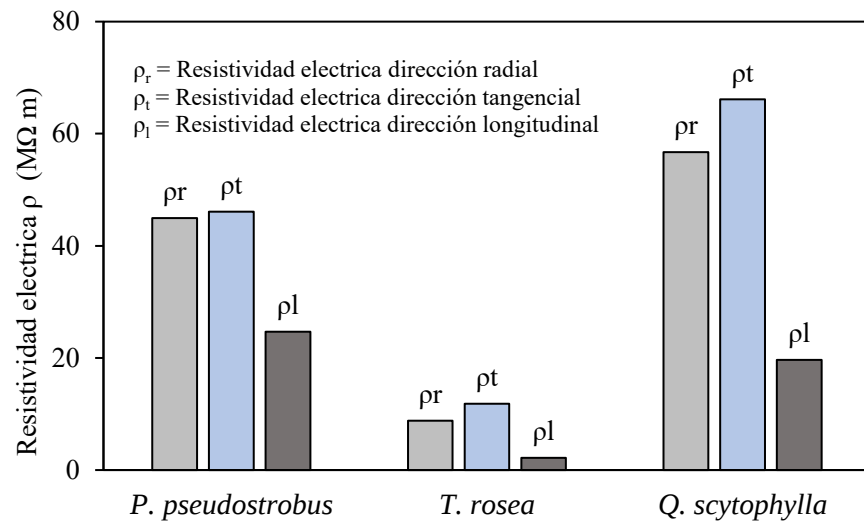


Fig. 77 Comparación de la resistividad eléctrica (ρ) entre las direcciones radial (r), tangencial (t) y longitudinal (l) y entre especies.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas en la investigación aportaron argumentos para responder a las preguntas de investigación, alcanzar los objetivos de la tesis y verificar sus hipótesis.

4.1 Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrobus* Lindl.

Los resultados permiten proponer al ultrasonido como técnica para caracterizar los tres tipos de material en una escala de probetas de pequeñas dimensiones. El pegamento y la malla modifican la densidad, velocidad y módulo dinámico de la madera laminada y del multimaterial, respecto a la madera sólida.

Es recomendable realizar investigaciones intensivas para analizar la estructura anatómica y las propiedades físico-químicas del adhesivo y de la malla que intervienen en la velocidad y en el módulo dinámico. Para mejorar la caracterización de la madera laminada y del multimaterial, se recomienda realizar investigaciones intensivas con diferentes especies y configuraciones de las probetas, así como emplear otros tipos de pruebas no destructivas y destructivas.

4.2 Madera laminada y madera multimaterial-adhesivo-malla como reemplazo de madera maciza en restauración de edificios históricos.

La variación de las densidades entre las tres muestras no varió significativamente. De tal forma, se puede inferir que la anisotropía de la velocidad de onda en la madera es el parámetro que caracteriza la magnitud del módulo dinámico en cada una de las direcciones de los especímenes. Sin embargo, es necesario considerar el efecto a nivel local del adhesivo y de la malla que componen la madera laminada y el multimaterial.

La velocidad de onda, el módulo dinámico y el factor de calidad son diferentes para las probetas de madera sólida, de madera laminada y del multimaterial, las cuales fueron fabricadas con la

especie *P. pseudostrobus*. Esta conclusión es válida para la comparación entre los diferentes grupos de especímenes estudiados, pero entre las mismas direcciones de anisotropía observadas.

El factor de calidad de la madera laminada es similar a la de la madera sólida. Así, este material compuesto puede sustituir a la madera sólida en estructuras de madera. En el mismo contexto, el factor de calidad correspondiente a la dirección radial sugiere que, en esta dirección, la rigidez del multimaterial es mayor comparativamente con las de la madera sólida y laminada.

Las características de la madera laminada y del multimaterial son similares a las de la madera laminada y sólida de *P. pseudostrobus*. De tal forma, los dos materiales compuestos tienen buenas perspectivas para sustituir elementos estructurales que funcionan como elementos de resistencia en estructuras de madera. Para mejorar la caracterización de la madera laminada y del multimaterial, se recomienda realizar investigaciones intensivas con diferentes especies y configuraciones de las probetas, así como emplear otros tipos de pruebas no destructivas y destructivas.

4.3. Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de *Pinus pseudostrobus*.

Se encontró experimentalmente que las densidades, velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos de la madera laminada de *P. pseudostrobus* son similares a las de madera sólida de esta especie. Igualmente, se corroboró que el tratamiento de laminado aumenta las velocidades y los módulos dinámicos en la dirección longitudinal, no así para las direcciones radial y tangencial. Además, la variabilidad en las características estudiadas disminuye como efecto de reconstituir madera sólida.

El aporte principal de este estudio radica en proporcionar datos de referencia e informar que la madera de esta especie, sólida y laminada, puede ser caracterizada con un método no destructivo. Para su posible aplicación en diseño estructural, es necesario efectuar pruebas estandarizadas en piezas con dimensiones de empleo.

4.4. Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas.

Los valores de las densidades, de las velocidades del ultrasonido y de los módulos dinámicos para las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea*, *Quercus* spp., *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* presentan una amplia diversidad entre especies y en una especie. Esta variabilidad se puede caracterizar con los coeficientes de variación y de determinación.

Las pruebas de ultrasonido son útiles para confirmar el carácter anisotrópico de la velocidad del ultrasonido y del módulo dinámico de la madera. Para esto, es suficiente un tamaño de muestra de 35 probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal.

4.5. Módulos de rigidez de la madera sólida de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*.

Los resultados muestran que las magnitudes de los módulos de rigidez de maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía, pero diferentes entre especies. De esta forma, se verifica la hipótesis de la investigación. Esta conclusión está acotada para las especies estudiadas y a la metodología de la presente investigación.

La estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie, con el objetivo de caracterizar las maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* con un enfoque empírico de caso por caso de una especie en particular. El procedimiento está referido a las condiciones de ensayo: la densidad y el contenido de humedad de la madera y con datos derivados de un tamaño de muestra estadísticamente representativa.

4.7. Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo

En la presente investigación se estudiaron 51 probetas de madera sólida y 51 de multimaterial madera-malla-adhesivo elaboradas con maderas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. se determinaron sus densidades, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos. se analizaron los

resultados probetas por probeta de una misma especie, su anisotropía y se calcularon las correlaciones estadísticas entre los parámetros estudiados. igualmente, se analizó la influencia de las mallas en los resultados promedio.

Por la elaboración del multimaterial, la densidad, la velocidad del ultrasonido y el módulo dinámico de la madera sólida aumentan; en cambio, su variabilidad y anisotropía disminuyen. la malla y el adhesivo funcionan como componentes estabilizadores, por esto en el multimaterial disminuye la magnitud de la velocidad longitudinal, pero aumenta la tangencial. Para determinar los parámetros en cada una de las tres especies estudiadas son suficientes 17 probetas, con excepción de la densidad y la velocidad del ultrasonido de *P. pseudostrobus*. la densidad no es un buen predictor de la velocidad del ultrasonido. en cambio, es un predictor medio del módulo dinámico.

4.8. Vibraciones transversales para determinar en multimaterial madera-malla-adhesivo su módulo dinámico e índice material.

Las pruebas de vibraciones transversales son eficientes para determinar el módulo dinámico en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo. El tamaño de la muestra de 36 probetas es suficiente para determinar el módulo dinámico. Las magnitudes de la densidad, del módulo dinámico y del índice material son similares a los reportados en la bibliografía para maderas con densidades semejantes. La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico; en cambio, la frecuencia sí lo es.

La transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, disminuye la variabilidad natural de la madera de *F. crenata*. Asimismo, la densidad del multimaterial aumenta respecto a la de la madera sólida. La prospectiva de los resultados está restringida por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de la madera de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo y son válidas para las condiciones particulares de la metodología empleada en esta investigación.

4.9. Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*.

El módulo de rigidez de la madera de *F. crenata*, determinado con pruebas de torsión dinámica, aumenta por el hecho de transformarla en un multimaterial compuesto de madera, malla y adhesivo. En contraste, la variabilidad natural del módulo de rigidez de *F. crenata* disminuye. De tal forma que el multimaterial exhibe una mejora tecnológica por el aumento y por la estabilidad de su rigidez cuando está sometido a deformaciones angulares elásticas. De esta manera, la caracterización mecánica del multimaterial lo prospecta con un potencial de innovación en aplicaciones no tradicionales de la madera sólida en la edificación residencial.

4.10. Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas.

La magnitud de las características higroscópicas de las maderas *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia* es similar a las de otras especies mexicanas reportadas en la literatura.

Los modelos estadísticos permiten predecir el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos en función de la densidad básica de la madera.

La estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie. De acuerdo con el paradigma contemporáneo en ciencias de la madera, es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular.

Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

4.11. Higroexpansión, higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas.

Se determinaron la densidad y las características higroscópicas de ocho maderas mexicanas: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia*. La densidad de la madera de las ocho maderas estudiadas en la presente investigación, como predictor del carácter anisotrópico de los coeficientes de higrocontracción e higroexpansión, evidencian una correlación media con pendiente positiva.

La magnitud de las características higroscópicas de las especies estudiadas es semejante a las de otras maderas mexicanas reportadas en investigaciones previas. Las magnitudes de las higrocontracciones e higroexpansiones son mayores en la dirección tangencial en comparación con la dirección radial. Lo que implica que el diseño de estructuras y productos de madera debe considerar la diferente modificación en las dimensiones de una pieza de madera cuando está sometida a cambios en su contenido de humedad.

Para fines de cálculo y diseño ingenieril, es recomendable considerar la influencia de la variación de los valores de las características físicas entre especies de madera, el efecto de las dimensiones y de la calidad entre las probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos de crecimiento, así como la posible diferencia de los valores correspondientes a elementos estructurales, tales como vigas y columnas con calidad y las dimensiones empleadas en ingeniería de la madera.

4.12. Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

El dispositivo utilizado en la presente investigación puede medir la resistencia eléctrica en probetas de pequeñas dimensiones y posteriormente calcular su resistividad.

La resistividad eléctrica de las maderas *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* denota un carácter anisotrópico y una variabilidad entre las especies estudiadas.

6. REFERENCIAS

1. A. Y. Aydin y M. Aydin, "Effect of density and propagation length on ultrasonic longitudinal wave velocity in some important wood species grown in Turkey", *Türkiye Ormancılık Dergisi*, vol. 19, no. 4, pp. 413-418, 2018. DOI: 10.18182/tjf.459005.
2. Papadopoulos, A. N. (2020a). Advances in Wood Composites. *Polymers*, 12, 1-8. <https://doi.org/10.3390/polym12010048>.
3. A. Bartholomeu, R. Gonçalves y V. Bucur, "Dispersion of ultrasonic waves in *Eucalyptus* lumber as a function of the geometry of boards", *Scientia Forestalis*, vol. 63, pp. 235-240, 2003.
4. A. Hanhijärvi, A. Ranta-Maunus y G. Turk. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques* [En línea]. Disponible en: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2005/P568.pdf>.
5. Abdelmohsen, S., Adriaenssens, S., El-Dabaa, R., Gabriele, S., Olivieri, L., & Teresi, L. (2019). A multi-physics approach for modeling hygroscopic behavior in wood low-tech architectural adaptive systems. *Computer-Aided Design*, 106, 43-53.
6. Ajuziogu, G. C., Amujiri, A. N., Njoku, E. U., Ozokolie, C. B., & Ojua, E. O. (2020). Determination of Swelling and Dimensional Stability of Some Nigerian Timber Species. *Annual Research & Review in Biology*, 35(1), 24-29.
7. Alfredsen, G., y Larnøy, E. (2006). Dynamic MOE testing of wood: the influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration. *Wood Research*, 51(1), 11-20. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/200601/02.pdf>.
8. Almeida, G., Huber, & F., Perré, P. (2014). Free shrinkage of wood determined at the cellular level using an environmental scanning electron microscope. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(2), 187-198.
9. American Institute of Timber Construction. (2007). *Laminated Timber Architecture*. Centennial: American Institute of Timber Construction.
10. American Institute of Timber Construction. (2012). *Timber Construction Manual*. Hoboken: John Wiley & Sons.

11. American Institute of Timber Construction. 2012. Timber Construction Manual. Englewood, USA: American Institute of Timber Construction.
12. American National Standards Institute [ANSI]. (2018). ANSI 405-2018: *Standard for Adhesives for Use in Structural Glued Laminated Timber*. Washington: American National Standards Institute.
13. American National Standards Institute [ANSI]. (2020). ANSI 117-2020: *Standard Specification for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species*. Washington: American National Standards Institute.
14. American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM D4446/D4446M-13. Standard Test Method for Anti-Swelling Effectiveness of Water-Repellent Formulations and Differential Swelling of Untreated Wood When Exposed to Liquid Water Environments West Conshohocken: ASTM.
15. American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM D143-14. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
16. American Society for Testing and Materials. (2015a). ASTM C1259-15. *Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration*. West Conshohocken, U.S.A.: American Society for Testing and Materials.
17. American Society for Testing and Materials. (2015b). ASTM E1876-15. *Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration*. West Conshohocken, U.S.A.: American Society for Testing and Materials.
18. American Society for Testing and Materials. 2015a. ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, USA: American Society for Testing and Materials.
19. American Society for Testing and Materials. 2015b. ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken, USA: American Society for Testing and Materials.
20. American Wood Council. 2015. National Design Specifications (NDS) for Wood Construction with Commentary. Lessbourg, USA: American Wood Council.

21. Anshari, B., Guan, Z. W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., & Komatsu, K. 2011. Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar. *Construction and Building Materials*, Vol. 25. No. 4, pp. 1718-1725.
22. Antonio Miravete, E. Larrodé, L. Castejón, R. Clemente, M.A. Jiménez, M. Lizaranzu, J. Cuartero, D. Revuelta, C. Millán, V. Gómez, J. Calvo, N. Tolosana y J.L. Peralta. 2012. *Materiales compuestos tomo 1*. Barcelona España. Editorial REVERTE. S.A.
23. Araujo Molina, O., Cerón Cardaña, M., Chan Martín, M., & Azueta García, M. (2005). Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana. *Ingeniería*, 9(1), 5-12.
24. Arzola-Villegas, X., Lakes, R., Plaza, N. Z., & Jakes, J. E. (2019). Wood Moisture-Induced Swelling at the Cellular Scale—Ab Intra. *Forests*, 10, 996.
25. Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *building and environment*, 114, 307-332. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.
26. Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307-332. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.
27. Ashby, M. F. 2011. *Materials selection in mechanical design*. London: Butterworth-Heinemann.
28. ASTM D3737-12. (2012). *Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)*. West Conshohocken: ASTM International.
29. Ávila, L. E., & Herrera, M. A. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2), 227-232.
30. B. Anshari, Z. W. Guan, A. Kitamori, K. Jung, I. Hassel y K. Komatsu, “Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1718-1725, abr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.095>
31. Baar, J., Tippner, J., & Gryc, V. (2012). The influence of wood density on longitudinal wave

- velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(5), 767- 769. doi: 10.1007/s00107-011-0550-2.
32. Baar, J., Tippner, J., y Gryc, V. (2016). Wood anatomy and acoustic properties of selected tropical hardwoods. *IAWA Journal*, 37(1), 69-83. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160121>.
 33. Bachtiar, E. V., Sanabria, S. J., Mittig, J. P., & Nimes, P. (2017). Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques. *Wood Science and Technology*, 51(1), 47-67. doi: 10.1007/s00226-016-0851-z
 34. Badel, E., Bakour, R., & Perré, P. (2006). Investigation of the relationships between anatomical pattern, density and local swelling of oak wood. *IAWA Journal*, 27(1), 55-71.
 35. Baradit E., Fuentealba, C., & Yáñez, M. (2021). Elastic constants of chilean *pinus radiata* using ultrasound. *maderas. ciencia y tecnología*, 23(27), 1-10. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100427>.
 36. Bárcenas Pazos, G. M. (1985). *Recomendaciones del uso de 80 especies de acuerdo con su estabilidad dimensional*. Nota Técnica no.11. Xalapa: LACITEMA-INIREB.
 37. Bárcenas Pazos, G. M. (1995). Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la Selva Lacandona. *Madera y Bosques*, 1(1), 9-38.
 38. Bárcenas Pazos, G. M. (2020). Banco de información sobre características tecnológicas de maderas mexicanas. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). México: Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
 39. Bardak, T. (2019). Effects of Different Advanced Engineering on Deformation Behaviour of Wood Structural Materials. *Bioresources*, 14(1), 180-192. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.1.180-192>.
 40. Bartholomeu, A., Gonçalves, R., & Bucur, V. (2003). Dispersion of ultrasonic waves in *Eucalyptus* lumber as a function of the geometry of boards. *ScientiaForestalis*, 63, pp. 235-240
 41. Beguin, J. (2011, octubre). Los materiales Compuestos Dinamismo e Innovación. Retrieved from <http://www.insee.fr/sessi/4pages/pdf/4p158espanol>.
 42. Berry, S. L., & Roderick, M. L. (2005). Plant–water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168, 25-37.

43. Besednjak, A., y Dietrich, A. B. (2005). *Materiales compuestos* (vol.100). Univ. Politec de Catalunya.
44. Borgström, E. (Ed.). (2016a). *Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volumen 1*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-1-2016.pdf>.
45. Borgström, E. (Ed.). (2016b). *Design of timber structures. Rules and formulas according to Eurocode 5 (Volume 2)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-2-2016.pdf>.
46. Borgström, E. (Ed.). (2016c). *Design of timber structures. Examples. (Volume 3)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-3-2016.pdf>.
47. Borgström, E. (Editor). (2016). *Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volume 1*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation.
48. Borja de la Rosa, A., Machuca, R., Fuentes Salinas, M., Ayerde Lozada, D., Fuentes López, M., & Quintero Alcantar, A. (2010). Caracterización tecnológica de la madera de *Juniperus flaccida* var. *poblana martínez*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 261-280.
49. Borri, A., Corradi, M., y Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites: Part B*, 36, 143-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.04.013>.
50. Bourreau, D., Aimene, Y., Beauchêne, J. & Thibaut, B. (2013). Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71, 653-662. doi: 10.1007/s00107-013-0721-4
51. Branco, J. M., Sousa, H. S., and Tsakanika, E. 2017. Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses. *Engineering Structures*, 140, pp. 209-224.
52. Brandner, R., Tomasi, R., Moosbrugger, T., Serrano, E., & Dietsch, P. Editors. 2018. *Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber: A state-of-the art report by Cost*

- action FP1402/WG2. Aachen, Germany: Shaker Verlag.
53. Brémaud, I. (2012). Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 807-818. doi: 10.1121/1.3651233.
 54. Brémaud, I., Gril, J., & Thibaut, B. (2011). Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45(4), 735-754. doi: 10.1007/s00226-010-0393-8
 55. Bucur, V., & Declercq, N. (2006). The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique. *Ultrasonics*, 44, 829-831. doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.203
 56. Burdurlu, E., Kilic, M., Ilce, A. C., & Ozan, U. (2007). The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L.) and lombardy poplar (*Populus nigra* L.). *Construction and Building Materials*, 21(8), 1720-1725. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.05.002
 57. Byeon, J. W., Cho, Y. J., Lee, J. R., y Park, H. M. (2016). Static Bending Strength Performance of Domestic Wood-Concrete Hybrid Laminated Materials. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(1), 48-56. <http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.1.48>.
 58. C. Kohlhauser y C. Hellmich, “Determination of Poisson’s ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: application to metals and wood”, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 33, pp. 82-98, may.-jun. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.11.009>.
 59. C. S. Montes, J. C. Weber, R. A. García, D. A. Silva y G. I. Muñiz, “Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali”, *Trees*, vol. 31, no. 3, pp. 833-849, en. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1508-0>
 60. Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L., y Domingues, J. J. M. S. (2010). Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*, 24, 531-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>.
 61. Canadian Wood Council. 2017. Wood Design Manual 2017. Vol. 1 & 2. Ottawa, Canada: Canadian Wood Council.

62. Cañola, H. D., Echavarría, C., y Echavarría, B. (2018). Glulam beams reinforced with punched metal plates. *DYNA*, 85(204), 127-133. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67847>.
63. Carmeliet, J., Chen, M., & Derome, M. (2018). Sorption hysteresis in wood and its coupling to swelling: a new modelling approach. Proceedings of the 7th International Building Physics Conference, IBPC2018. Syracuse: Curran Associates. pp. 343-348.
64. Caruso, M. C., Menna, C., Asprone, D., Prota, A., y Manfredi, G. (2017). Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures. *ACI Structural Journal*, 114(2), 323-336. doi: <http://dx.doi.org/10.14359/51689426>.
65. Casans Berga, S., Garcia-Gil, R., Navarro Anton, A. E., and Rosado-Muñoz, A. 2019. Novel Wood Resistance Measurement Method Reducing the Initial Transient Instabilities Arising in DC Methods Due to Polarization Effects. In: *Electronics*, 8(11), 1253. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8111253>
66. Cavalli, A., Cibecchini, D., Goli, G., Togni, M. (2017). Shear modulus of old timber. *iForest*, 10: 446-450. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor1787-009>
67. Cha, J. K. 2015. Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 36-42.
68. Chang, W. S. 2015. Repair and reinforcement of timber columns and shear walls. A review. *Construction and Building Materials*, 97, pp. 14-24.
69. Charleson, A. & Perez, N. (2009). Long-Span Timber Buildings. A Review of Recent International Projects. *New Zealand Timber Design Journal*, 17(4), pp. 19-28.
70. Chauhan, S., & Sethy, A. 2016. Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity. *Maderas. Ciencia y tecnología*, Vol. 18, No. 2, pp. 373-382.
71. Chiniforush, A. A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., & Malekmohammadi, S. (2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 207, 70-83.
72. Clauß, S., Gabriel, J., Karbach, A., Matner, M., y Niemz, P. (2011). Influence of the adhesive formulation on the mechanical properties and bonding performance of polyurethane prepolymers. *Holzforschung*, 65, 835-844. <http://dx.doi.org/10.1515/HF.2011.095>.
73. Comisión Nacional Forestal. (Sin fecha). *Paquetes Tecnológicos*. *Pinus pseudostrobus Lindl.*

- var pseudostrobus*. *Sistema de Información para la Reforestación*. México: Comisión Nacional Forestal. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/981Pinus%20pseudostrobus.pdf>.
74. Conroy, K., Riggio, M., & Knowles, C. (2018). Familiarity, Use, and Perceptions of Wood Building Products: A Survey Among Architects on the United States West Coast. *BioProducts Business*, 3(10), 118-135. doi: <https://doi.org/10.22382/bpb-2018-010>.
 75. Corigliano, P., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Maugeri, N., y Marin, A. (2017). Experimental and theoretical analyses of Iroko wood laminates. *Composites Part B*, 112, 251-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.049>.
 76. Corradi, M., Righetti, L., y Borri, A. (2015). Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials*, 8, 4034-4049. <http://dx.doi.org/10.3390/ma8074034>.
 77. Croatto, G., and Turrini, U. 2014. Restoration of historical timber structures. Criteria, innovative solutions and case studies. In: Restoration of historical timber structures. Lourenço, P. B., Branco, J. M., and Sousa, H. S. (eds.). pp. 119-136.
 78. Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, and M., Lourenço, P. B. 2015. Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), pp. 277-289.
 79. D. Guitard y C. Gachet, "Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois", *Annals of Forest Science*, vol. 61, no. 2, pp. 129-139, 2004. <https://doi.org/10.1051/forest:2004004>
 80. D. Ponneth, A. E. Vasu, J. C. Easwaran, A. Mohandass y S. S. Chauhan, "Destructive and non-destructive evaluation of seven hardwoods and analysis of data correlation", *Holzforschung*, vol. 68, no. 8, pp. 951-956, 2014. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0193>.
 81. Da costa, C.E., López, F.V., y Castelló, J.M.T. (2000). Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones. *Revista de metalurgia*, 36(3), 179-192.
 82. Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., & crews, k. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *construction and building materials*, 102, 963-976. doi: 0.1016/j.conbuildmat.2015.07.195
 83. Darzi, S., Karampoura, H., Gilbert, B. P., y Bailleres, H. (2018). Numerical study on the flexural capacity of ultra-light composite timber sandwich panels. *Composites Part B*:

- Engineering, 155, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.022>.
84. De Almeida, G., Huber, F., Perré, P. (2014). Free shrinkage of wood determined at the cellular level using an environmental scanning electron microscope. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(2), 187-198.
85. De Almeida, T. H., De Almeida, D. H., Aquino, V. B. M., Chahud, E., Pinheiro, R. V., Branco, L. A. M. N., De Almeida, J. P. B., Christoforo, A. L. & Lahr, F. A. R. (2020). Investigation of the Fiber Saturation Point of Tropical Brazilian Wood Species. *BioResources*, 15(3), 5379-5387.
86. De Almeida, T., De Almeida, D. H., De Araujo, V. A., Da Silva, S. A. M., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2017). Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. *BioResources*, 12(3), 6579-6590.
87. De Cicco, D., y Taheri, F. (2018). Use of a Simple Non-Destructive Technique for Evaluation of the Elastic and Vibration Properties of Fiber-Reinforced and 3D Fiber-Metal Laminate Composites. *Fibers*, 6(1), 14-37. <http://dx.doi.org/10.3390/fib6010014>.
88. De Lima, A. J. M., Iwakiri, S., y Trianoski, R. (2020). Determination of the physical and mechanical properties of wood-cement boards produced with *Pinus* spp and pozzolans waste. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(4), 527-536. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000411>.
89. Derome, D., Griffa, M., Koebel, M., & Carmeliet, J. (2011). Hysteretic swelling of wood at cellular scale probed by phase-contrast X-ray tomography. *Journal of Structural Biology*, 173, 180-190.
90. Derome, D., Rafsanjani, A., Hering, S., Dressler, M., Patera, A., Lanvermann, C., Sedighi-Gilani, M., Wittel, F. K., Niemz, P., & Carmeliet, J. (2013). The role of water in the behavior of wood. *Journal of Building Physics*, 36(4), 398-421.
91. Derome, D., Zhang, C., Chen, M., & Carmeliet, J. (2018). Understanding swelling of wood through multiscale modeling. *Proceedings of the 7th International Building Physics Conference, IBPC2018*. Syracuse: USA. pp. 335-360.
92. Dias, B. Z., y De Alvarez, C. E. (2017). Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic composites. *Ambiente Construído*, 17(2), 201-219. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200153>.
93. Dickson, A., & Dawson, B. (2020). Using Cell Cross-section Dimensions and Digital Image

- Correlation to Evaluate Drying Shrinkage and Collapse in Eucalyptus Nitens Wood. *BioResources*, 15(3), 6149-6164.
94. Dietsch, P. y Köhler, J. (2010). *Assessment of Timber Structures. Modelling of the Performance of Timber Structures. European Science Foundation*. Herzogenrath: Shaker Verlag.
 95. Dietsch, P., & Tannert, T. (2015) Assessing the integrity of glued-laminated timber elements. *Construction and Building Materials*, 101(2), 1259-1270. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064.
 96. Dietsch, P., y Brandner, R. (2015). Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 97, 78-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>.
 97. Diez, S.G. (2011). Fibras y materiales de refuerzo: Los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas en 3D. *Revista iberoamericana de polímeros*, 12(5).
 98. Dubey, M. K., Pang, S., & Walker, J. (2011). Effect of oil heating age on colour and dimensional stability of heat treated *Pinus radiata*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(2), 255-262.
 99. E. A. Wheeler, P. Baas y P. E. Gasson, “IAWA list of microscopic features for hardwoods identification”, *IAWA Bulletin*, vol. 10, no. 3, pp. 219-332, 2007.
 100. E. V. Bachtar, S. J. Sanabria, J. P. Mittag y P. Niemz, “Moisture-dependent elastic characteristics of walnut and cherry wood by means of mechanical and ultrasonic test incorporating three different ultrasound data evaluation techniques”, *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 47-67, en. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0851-z>
 101. Echenique, C. S., Banda, B.I., & Hernández, J. R. 2015. Physical and Mechanical Properties of the Wood Used in Indigenous Housing of the Tuchín Township, Department of Cordoba. Colombia. INGE CUC, Vol. 11, No. 1, pp. 99-108.
 102. El-Dabaa, R., & Abdelmoshen, S. (2019). HMTM: Hygromorphic-Thermobimetal Composites as a Novel Approach to Enhance Passive Actuation of Adaptive Façades. 18th International Conference, CAAD Futures 2019, Proceedings. Daejeon, Korea: Springer. 567-577.
 103. Englund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., & Hill, C. A. S. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47(1), 141-161.

104. Ettelaie, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z., & Ebrahimi, G. (2019). Prediction of modulus of elasticity of poplar wood using ultrasonic technique by applying empirical correction factors. *Measurement*, 135, 392-399. doi: 10.1016/j.measurement.2018.11.076
105. F. Arriaga, D. F. Llana, M. Esteban y G. Íñiguez-González, “Influence of length and sensor positioning on acoustic time-of-flight (ToF) measurement in structural timber”, *Holzforschung*, vol. 71, no. 9, pp. 713-723, 2017. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0214>.
106. Faraldos Marisol y Goberna Consuelo, 2011. Técnicas de análisis y caracterización de materiales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Madrid. Primera edición: 2002. Segunda. A ed. rev. y aum. e-NIPO: 472-11-178-0, e-ISBN: 978-84-00-09387-7.
107. F. G. Rosa de Oliveira y A. Sales, “Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods”, *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 18, pp. 2443-2446, dic. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.050>.
108. Fang, C. H., Cloutier, A., Blanchet, P., Koubaa, A., & Mariotti, N. (2011). Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part I: dimensional stability. *BioResources*, 6(1), 373-385.
109. Faydi, Y., Brancheriau, L., Pot, G., y Collet, R. (2017). Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. *BioResources*, 12(3), 5913-5927. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5913-5927>.
110. Fink, G., Honfi, D., Kohler, J., y Dietsch, P. (Eds.). (2018). *Basis of Design Principles for Timber Structures. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 1*. Germany: Shaker Verlag Aachen. Recuperado de <https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/11/Basis-of-Design-Principles-for-Timber-Structures.pdf>.
111. Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook. Wood as an engineering material. General Technical Report FPLGTR- 190. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison.
112. Franke, B., Franke, S., and Harte, A. M. 2015. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams. State of the art. *Construction and Building Materials*, 97, pp. 2-13.
113. Fediuk, A., Wilken, D., Wunderlich, T., and Rabbel, W. 2020. Physical Parameters and Contrasts of Wooden Objects in Lacustrine Environment: Ground Penetrating Radar and Geoelectrics. In: *Geosciences*, 10, 146. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10040146>
114. Fernández-Golfin, J., Conde Garcia, M., Conde Garcia, M., Fernández-Golfin, J. J., Calvo

- Haro, R., Baonza Merino, M. V., and de Palacios, P. 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements. In: *Forest Systems*, 21(1), 121-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>
115. Fredriksson, M., Thybring, E. E., and Zelinka, S. L. 2021. Artifacts in electrical measurements on wood caused by non-uniform moisture distributions. In: *Holzforschung*, 75(6), 517-525. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0138>
 116. Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Liu, H., & Zhou, F. (2019). Changes of water related properties in radiata pine wood due to heat treatment. *Construction and Building Materials*, 227, 116692.
 117. Fuentes Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
 118. Gáborik, J., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kašíčková, V., y Sikora, A. (2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated Wood. *BioResources*, 11(4), 10565-10574. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>.
 119. Gaff, M. & Gáborik, J. (2014). Effect of Cyclic Loading on the Elasticity of Beech Solid and Laminated Wood. *BioResources*, 9(3), 4288-4296. doi: 10.15376/biores.9.3.4288-4296
 120. García Esteban, L. G., Gril, J., De Palacios, P., & Guindeo Casasús, A. (2005). Reduction of wood hygroscopicity and associated dimensional response by repeated humidity cycles. *Annals of Forest Science*, 62(3)275-284.
 121. Garcia, E. L. (2002). *Madera laminada encolada. La madera y su tecnología*. Madrid: Mundi-Prensa.
 122. Ghosh, S. C., Militz, H., y Mai, C. (2008). Decay resistance of treated wood with functionalized commercial silicones. *BioResources*, 3(4), 1303-1314. Recuperado de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_03/BioRes_03_4_1303_Ghosh_MM_Decay_Resis_Treated_Wood_Silicones_313.pdf.
 123. Gonçalves, R. A., Trinca, J., and Pellis, B. P. 2014. Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens. *Wood Science and Technology*, 48(2), pp. 269-287.
 124. Grönquist, P., Wood, D., Hassani, M. M., Wittel, F. K., Menges, A., & Rüggeberg, M. (2019). Analysis of hygroscopic self-shaping wood at large scale for curved mass timber structures. *Science Advances*, 5, eaax 1311.
 125. Ganthaler, A., Sailer, J., Bär, A., Losso, A., and Mayr, S. 2019. Noninvasive Analysis of

- Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. In: *Frontiers in Plant Science*, 10, 1455. DOI: <http://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>
126. Gao, S., Bao, Z., Wang, L., and Yue, X. 2018. Comparison of voltammetry and digital bridge methods for electrical resistance measurements in wood. In: *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 161-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.004>
 127. Gao, S., Yue, X., and Wang, L. 2019. Effect of the degree of decay on the electrical resistance of wood degraded by brown-rot fungi. In: *Canadian Journal of Forest Research*, 49(2), 145-153. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0282>
 128. Guo, H., Büchel, M., Li, X., Wäckerlin, A., Chen, Q., and Burgert, I. 2018. Dictating anisotropic electric conductivity of a transparent copper nanowire coating by the surface structure of wood. In: *Journal of the Royal Society Interface*, 1520170864. DOI: <http://doi.org/10.1098/rsif.2017.0864>.
 129. Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. F., Zhou, L., y Feng, D. (2016). Measurement of Dynamic Viscoelasticity of Full-Zise Wood Composites Panels Using a Vibration Testing Method. *BioResources*, 11(2), 4593-4604. Recuperado de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_2_4593_Guan_ZHZF_Meas_Dynamic_Viscoelasticity_Wood_Comp_Vibration_Method_9199.pdf.
 130. Gubana, A. 2015. State-of-the-Art Report on high reversible timber to timber strengthening interventions on wooden floors. *Construction and Building Materials*, 97, pp. 25–33.
 131. Guerrero, R. L. (2014). Edificios Altos de Arquitectura Avanzada. Caso de estudio: LAKE SHORE APARMENT. Valencia, España.
 132. Guitard, D., & Gachet, C. (2004). Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de la variabilité intra-arbre de l'anisotropie élastique du bois. *Annals of Forest Science*, 61(2), 129-139. doi: 10.1051/forest:2004004
 133. Gutiérrez Pulido, H. y De La Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
 134. Gutiérrez, H., & De la Vara, R. 2009. *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
 135. H. G. Richter, D. Grosser, I. Heinz y P. E. Gasson, "IAWA list of microscopic features for softwood identification", *Iawa Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 1-70, en. 2004.

<https://doi.org/10.1163/22941932-90000349>

136. H. Unterwieser y G. Schickhofer, “Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency-and ultrasonic runtime measurement”, *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 69, no. 2, pp. 171-181, my. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0417-y>.
137. Haag, V., Koch, G., Melcher, E., & Welling, J. (2020). Characterization of the wood properties of *Cedrelinga cateniformis* as substitute for timbers used for window manufacturing and outdoor applications. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(1), 23-36.
138. Hamid, N. H. A., Ahmad, M., & Suratman, M. N. (2011). Swelling and Shrinkage Characteristics of Kapur (*Dryobalanops aromatica*) Wood in Three Anatomical Directions. 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA). Langkawi, Malaysia: IEEE. pp. 98-101.
139. Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., y Turk, G. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project, phase 1*. Espoo, Finland: VTT Publications 568.
140. Hansmann, C., Konnerth, J., & Rosner, S. (2012). Digital image analysis of radial shrinkage of fresh spruce (*Picea abies* L.) wood. *Wood Material Science & Engineering*, 6(1-2), 2-6.
141. Hassankhani, M., Kord, B. & Pourpasha, M. M. (2015). Empirical statistical model for predicting wood properties of *Paulownia fortunei*. Part 1: physical and biometrical properties. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(4), 919-930.
142. Hafsa, W., Angellier, N., Takarli, M. and Pop, O. 2021. A mixed experimental-numerical electrical resistivity-based method for moisture content assessment in wood tested using the example of Douglas fir. In: *Wood Science and Technology*, 55(4), 697-718. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01281-x>
143. Hwang, S-W., Hwang, S-Y., Lee, T., Ahn, K-S., Pang, S-J., Park, J., Oh, J-K., Kwak, H. W. and Yeo, H. 2021. Investigation of Electrical Characteristics Using Various Electrodes for Evaluating the Moisture Content in Wood. In: *BioResources*, 16(4), 7040-7055. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7040-7055>.
144. Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2021). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A Review. *RSC Advances*, 7, 38604-

38630. doi: <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>.
145. Hering, S., Keunecke, D. & Niemz, P. (2012). Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood. *Wood Science and Technology*, 46(5), 927-938.
146. Hernández, R. E. (2007a). Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood and Fiber Science*, 39(1), 146-158.
147. Hernández, R. E. (2007b). Effects of extraneous substances, wood density and interlocked grain on fiber saturation point of hardwoods. *Wood Material Science and Engineering*, 2(1), 45-53.
148. Hernández, S. A., & Sotomayor, J. R. 2014. Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*. *Madera y Bosques*, Vol. 20, No. 3, pp. 113-123.
149. Herrera-Builes, J. F., Ananías, R. A., & Osorio, J. A. (2020). Incidencia de la impregnación de madera con alcohol polivinílico y polietilenglicol en algunas propiedades físicas y mecánicas de pino oocarpa. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(2), 213- 222.
150. Hill, C. A. S. (2006). *Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes*. West Sussex: John Wiley & Sons.
151. Ho, S. C. (2017). Anisotropy of Softwood Structural Lumber Using The Elastic Modulus Determined by The Ultrasonic Nondestructive Method. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 45(1), 20~27. doi: 10.5658/WOOD.2017.45.1.20.
152. Huda, A.S.M., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R., Périnet, P. & Fortin, Y. (2018). Phenotypic and Genotypic Correlations for Wood Properties of Hybrid Poplar Clones of Southern Quebec. *Forests*, 9(3), 140-156.
153. Hull, D. “Materiales Compuestos”, Ed. Reverté (2003).
154. I. Brémaud, “Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: biological and cultural diversity”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 807-818, en. 2012. <https://doi.org/10.1121/1.3651233>
155. I. Brémaud, J. Gril y B. Thibaut, “Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data”, *Wood Science and Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 735-754, nov. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0393-8>
156. I. Brémaud, Y. El Kaïm, D. Guibal, K. Minato, B. Thibaut y J. Gril, “Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types”, *Annals of Forest Science*, vol. 69, no. 3, pp. 373-386, abr. 2012.

<https://doi.org/10.1007/s13595-011-0166-z>

157. Icimoto, F. H., Calil Neto, C., Ferro, F. S., Borges de Macedo, L., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., y Calil Júnior, C. (2016). Influence of Lamellar Thickness on Strength and Stiffness of Glued Laminated Timber Beams of *Pinus oocarpa*. *International Journal of Materials Engineering*, 6(2), 51-55. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>.
158. Illic, J. (2003). Dynamic MOE of 55 species using small wood beams, *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61, 167-172.
159. Instituto nacional de técnica aeroespacial. Introducción a los materiales compuestos estructurales. Madrid, 2009.
160. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). 1999. Principles for the Preservation of Historic Timber Structures. México, ICOMOS. 3 pp.
161. International Organization for Standardization [ISO]. (2003). ISO 16978:2003. *Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. Geneva: International Organization for Standardization.
162. International Organization for Standardization [ISO]. (2014a). ISO 13061-1:2014. *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical*. Geneva: International Organization for Standardization.
163. International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). ISO 13061-2:2014. *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva: International Organization for Standardization.
164. International Organization for Standardization. (2016a). ISO 13061-13:2016. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage. Geneva: International Organization for Standardization.
165. International Organization for Standardization. (2016b). ISO 13061-14:2016. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 14: Determination of volumetric shrinkage. Geneva: International Organization for Standardization.
166. International Organization for Standardization. (2017a). ISO 13061-15:2017. Physical and

- mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 15: Determination of radial and tangential swelling. Geneva: International Organization for Standardization.
167. International Organization for Standardization. (2017b). ISO 13061-16:2017. Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 16: Determination of volumetric swelling. Geneva: International Organization for Standardization.
 168. International Organization for Standardization. 2014. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Brussels, Belgium. 4 p.
 169. International organization for standardization. 2014. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization. Brussels, Belgium. 5 p.
 170. International Organization for Standardization. 2014a. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
 171. International Organization for Standardization. 2014b. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
 172. Íñiguez-González, G., Arriaga, F., Esteban, M., and Llana, D. F. 2015. Reference conditions and modification factors for the standardization of nondestructive variables used in the evaluation of existing timber structures. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1166-1171.
 173. Ištok, I., Sedlar, T., Šefc, B., Sinkovi, T., & Perkovi, T. (2016). Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvna Industrija*, 67(2), 163-170.
 174. J. Baar, J. Tippner y V. Gryc, "The influence of wood density on longitudinal wave velocity determined by the ultrasound method in comparison to the resonance longitudinal method", *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 70, no. 5, pp. 767-769, sep. 2012.

- <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0550-2>.
175. J. Crespo, J. R. Aira, C. Vázquez y M. Guaita, “Comparative analysis of the elastic constants measured via conventional, ultrasound, and 3-D digital image correlation methods in *Eucalyptus globulus* Labill. *BioResources*, vol. 12, no. 2, pp. 3728-3743, 2017.
 176. J. Ilic, “Dynamic MOE of 55 species using small wood beams”, *Holz als Roh-und Werkstoff*, vol. 61, no. 3, pp. 167-172, jun. 2003. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0367-8>.
 177. J. R. Sotomayor Castellanos, “Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas: síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera”, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 15, no. 1, pp. 4-64, 2019.
 178. J. R. Sotomayor Castellanos, K. Adachi, R. Iida y T. Hayashi, “Anisotropía en velocidades de onda y módulos dinámicos determinados con ondas de esfuerzo en maderas mexicanas y japonesas”, *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 2020.
 179. J. R. Sotomayor Castellanos, L. I. Guridi Gómez y T. García Moreno, “Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas: velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad: base de datos”, *Investigación e Ingeniería de la Madera*, vol. 6, no. 1, pp. 3-32, 2010.
 180. Jakes, J. E., Plaza, N., Stone, D. S., Hunt, C. G., Glass, S. V., and. Zelinka, S. L. 2013. Mechanism of Transport Through Wood Cell Wall Polymers. In: Journal of Forest Products & Industries, 2(6), 10-13. DOI: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2013/fpl_2013_jakes002.pdf
 181. Jiang, Z-H., Chen, Z., Fen, B-H., Hou Z-Q., and Chen, G-H. 2003. Modeling Owendry Softwood Resistivity Based on the Resistor Network Theory. In: *Holzforschung*, 57(4), 415-420. DOI: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.061>.
 182. J. Tippner, J. Hrivnák y M. Kloiber, “Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods”, *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 503-518, 2016.
 183. Jacob, M., Harrington, J., & Robinson, B. (2018). *The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. Dublin: COFORD. 94 p. <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/TimberHandbook5Part130418.pdf>
 184. Jacob, M., Harrington, J., y Robinson, B. (2018). *The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. Dublin: COFORD. Recuperado de <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/TimberHandbook5Part130418.pdf>.

185. Jankowska, A., Drożdżek, M., Sarnowski, P., & Horodeński, J. (2017). Effect of Extractives on the Equilibrium Moisture Content and Shrinkage of Selected Tropical Wood Species. *Bioresources*, 12(1), 597-697.
186. Jasieńko, J., y Nowak, T. P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63, 81-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>.
187. Jaskowska-Lemanska, J., & Przesmycka, E. 2020. Semi-Destructive and Non-Destructive Tests of Timber Structure of Various Moisture Contents. *Materials*, Vol. 14, pp. 96-118.
188. Jayne, B. A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9(11), 413-416.
189. Joint Committee on Structural Safety. (2006). *Probabilistic model code. Part 3.5-Timber*. Joint Committee on Structural Safety.
190. Jorda, J., Kain, G., Barbu, M. C., Haupt, M., y Krišt'ák, L. (2020). Investigation of 3D-Moldability of Flax Fiber Reinforced Beech Plywood. *Polymers*, 12, 2852. <https://doi.org/10.3390/polym12122852>.
191. Jorge, F. C., Pereira, C., y Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst*, 62, 370-377. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>.
192. Juan Carlos Tamarit-Urias¹, Patricia Aguilar-Sánchez¹, Rogelio Flores-Velázquez²yMartha Elena Fuentes-López (2021). Aportes de investigación del INIFAP en tecnología de la madera y sus procesos de industrialización. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. Especial 35 aniversario INIFAP DOI:<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.1086>.
193. K. Hofstetter y E. K. “Gamstedt, Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood: a review COST Action E35 2004-2008: wood machining-micromechanics and fracture. *Holzforschung*, vol. 63, no. 2, pp. 130-138, 2009. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.018>
194. K. Ziemińska, M. Westoby y I. J. Wright, “Broad anatomical variation within a narrow wood density range: a study of twig wood across 69 Australian angiosperms”, *PLoS One*, vol. 10, no. 4, p. e0124892, abr. 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124892>.
195. K., de Borst, T. K. Bader y C. Wikete, “Microstructure-stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species”, *Journal of Structural Biology*, 177(2), pp. 532-542,

febr. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2011.10.010>

196. Kandler, G., Lukacevic, M., Zechmeister, C., Wolff, S., & Füssl, J. (2018). Stochastic engineering framework for timber structural elements and its application to glued laminated timber beams. *Construction and Building Materials*, 190, 573-592. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.129.
197. Karampour, H., Bismire, A., Bourges, M., Bailleres, H., Gilbert, B. P., Gunalan, S., (...) y Guan, H. (2018). Experimental investigation on the structural performance of timber-filled tubular steel stub columns. *2018 World Conference on Timber Engineering*, Seoul, Republic of Korea. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/327838307_experimental_investigation_on_the_structural_performance_of_timber-filled_tubular_steel_stub.
198. Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteanu, K., Lüthi, T., & Niemz, P. 2007. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 309-327.
199. Kielmann, B. C., Militz, H., y Mai, C. (2013). Strength Changes in Ash, Beech and Maple Wood Modified with a N-Methylol Melamine Compound and a Metal-Complex Dye. *Wood Research*, 58(3), 343-350. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/02.pdf>.
200. Kirker, G. T., Bishell, A. B., and Zelinka, S. L. 2016. Electrical properties of wood colonized by *Gloeophyllum trabeum*. In: *International Biodeterioration & Biodegradation*, 114, 110-115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.06.004>
201. Kloiber, M., Reinprecht, L., Hrivnák, J., and Tippner, J. 2016. Comparative evaluation of acoustic techniques for detection of damages in historical wood. *Journal of Cultural Heritage*, 20, pp. 622-631.
202. Kohl, D., Link, P., y Böhm, S. (2016). Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components. *Procedia CIRP*, 40, 557-561. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.133>.
203. Kohl, D., Long, T. H. N., & Böhm, S. (2017). Wood-Based Multi-Material Systems for Technical Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing*, 8, 611-618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>
204. Kohl, D., Long, T. H. N., y Böhm, S. (2017). Wood-Based Multi-Material Systems for Technical Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing*, 8, 611-618. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>.

205. Kohl, D., Von Boyneburgk, C., Feldmann, M., Heim, H. P., y Böhm, S. (2018). Characterization of wood-based multi-material systems under dynamic impact stress. *Wood Material Science & Engineering*, 15(3), 130-139. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1501605>.
206. Kohlhauser, C. & Hellmich, C. (2012). Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic mechanical testing of normal stiffnesses: application to metals and wood. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 33, pp. 82-98.
207. Koman, S., & Feher, S. (2015). Basic density of hardwoods depending on age and site. *Wood Research*, 60(6), 907-912.
208. Komán, S., & Feher, S. 2017. Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* wood planted in Hungaria. *Wood Research*, Vol. 62, No. 2, pp. 335-340.
209. Konopka, D., Gebhardt, C., y Kaliske, M. (2017). Numerical modelling of wooden structures. *Journal of Cultural Heritage*, 27S, S93-S102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.09.008>.
210. Král, P., Klímek, P., Mishra, P. K., Wimmer, R., y Děcký, D. (2015). Specific modulus and density profile as characterization criteria of prefabricated wood composite materials. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(2), 433-438. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201563020433>.
211. Kránitz, K., Deublein, M., & Niemz, P. (2014). Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures*, 47(6), 925-936. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>
212. Kües, U. (Ed.). (2007). *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts*. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen. <https://doi.org/10.17875/gup2007-262>.
213. Kusnindar., Dewi, S. M., Soehardjono, A., y Wisnumurti. (2018). Performance of glue laminated timber beams composed of sengon wood (*Albizia falcatara*) and coconut wood (*Cocos nucifera*) with nylon-threads reinforcement. *MATEC Web of Conferences*, 195, 02029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502029>.
214. Kwon, J. H., Shin, R. H., Ayrilmis, N., & Han, T. H. (2014). Properties of solid wood and laminated wood lumber manufactured by cold pressing and heat treatment. *Materials and Design*, 62, 375-381. doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.032

215. L. Cheng, J. Dai, Z. Yang, W. Qian, W. Wang, L. Chang, X. Li y Z. Wang, “Theoretical and experimental research on moisture content and wood property indexes based on nondestructive testing”, *BioResources*, vol. 15, no. 1, pp. 1600-1616, 2020.
216. Labans, E., Kalnins, K., y Bisagni, C. (2019). Flexural behavior of sandwich panels with cellular wood, plywood stiffener/foam and thermoplastic composite core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 21(2), 784-805. <https://doi.org/10.1177/1099636217699587>.
217. Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., & Hughes, M. (2013). Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science*, 48, 8530-8538.
218. Larsen, K. E., and Marstein, N. 2016. *Conservation of Historic Timber Structures. An ecological approach*. Oxford, United Kingdom, Butterworth-Heinemann. 129 pp.
219. LeDuigou, A., Keryvin, V., Beaugrand, J., Pernes, M., Scarpa, F., & Castro, M. (2019). Humidity responsive actuation of bioinspired hygromorph biocomposites (HBC) for adaptive structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 116, 36-45.
220. Lesar, B., Straže, A., & Humar, M., (2011). Sorption Properties of Wood Impregnated with Aqueous Solution of Boric Acid and Montan Wax Emulsion. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 1337-1345.
221. Li, J., Hunt, J. F., Gong, S., y Cai, Z. (2014). Wood-based tri-axial sandwich composite materials: design, fabrication, testing, modeling and application. In: *CAMX Conference Proceedings*. Orlando: CAMX-The Composites and Advanced Materials Expo.
222. Li, R., Natsuki, T., y Ni, Q. Q. (2015). A novel dynamic stress analysis in bimaterial composite with defect using ultrasonic wave propagation. *Composite Structures*, 132, 255-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.046>.
223. Losso, A., Sailer, J., Bär, A., Ganthaler, A., and Mayr, S. 2020. Insights into trunks of *Pinus cembra* L.: analyses of hydraulics via electrical resistivity tomography. In: *Trees*, 34, 999-1008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01976-x>.
224. Luo, Z., Guan, H., and Zhang, X. 2019. The temperature effect and correction models for using electrical resistivity to estimate wood moisture variations. In: *Journal of Hydrology*, 578, 124022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124022>
225. Liew, K. C. & Singan, G. (2016). Engineered wood composite of laminated veneer lumber: Physical and mechanical properties. *Materials Science Forum*, 842, 103-128. doi:

226. Liu, M., Xu, G., Wang, J., Wu, Z., Lv, J., & Xu, W. (2020). Effects of Shellac Treatment on Wood Hygroscopicity, Dimensional Stability and Thermostability. *Coatings*, 10, 881.
227. Llana, D. F., Íñiguez-González, G., Díez, M. R., & Arriaga, F. 2020. Nondestructive testing used on timber in Spain: A literature review. *Maderas. Ciencia y tecnología*, Vol. 22, No. 2, pp. 133,156.
228. M. Hasegawa, M. Takata, J. Matsumura y K. Oda, “Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood”, *Ultrasonics*, vol. 51, no. 3, pp. 296-302, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2010.10.001>
229. Macedo Alquicira, I., & Sotomayor Castellanos, J. R. (2021). Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrobus* Lindl. XXVII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Pachuca, México. <https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/MemoriasXXVII.pdf>
230. Macedo Alquicira, I., Sotomayor Castellanos, J. R., & Castro Sánchez, F. J. (2019). Laminated wood and multimaterial wood – adhesive meshas replacements of solid wood in restoration of historical buildings, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 711-718, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-711-2019>.
231. Machuca Velasco, R., Borja de la Rosa, A., Corona Ambriz, A., Zaragoza Hernández, I., Arreola Avila, J. G. & Jiménez Machorro, J. (2017). Xilotecnia of the wood of *Acacia schaffneri* from the State of Hidalgo, Mexico. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), 293-308.
232. Malesza, J. 2015. Possible defects in wood, wood parameters variability and some of its influence on quality of building structure. *Engineering Structures and Technologies*, Vol. 7, No. 2, pp. 67-80.
233. Manzo, G., Tippner, J., & Zatloukal, P. (2021). relationships between the macrostructure features and acoustic parameters of resonance spruce for piano sound. *applied sciences*, 11, 1749-1753. doi: <https://doi.org/10.3390/app1104>.
234. Markström, E., Kuzman, M. K., Bystedt, A., & Sandberg, D. (2019). Use of wood products in multi-storey residential buildings: views of Swedish actors and suggested measures for an increased use. *Wood Material Science & Engineering*, 14:6, 404-419. doi: <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1600164>.
- 235.

236. Marzi, T. (2015). Nanostructured materials for protection and reinforcement of timber structures: A review and future challenges. *Construction and Building Materials*, 97, 119-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016>.
237. Martin, T., and Günther, T., 2013. Complex resistivity tomography (CRT) for fungus detection on standing oak trees. In: *European Journal of Forest Resources*, 132(5-6), 765-776. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0711-4>
238. Merk, V., Chanana, M., Gierlinger, N., Hirt, A. M., y Burgert, I. (2014). Hybrid Wood Materials with Magnetic Anisotropy Dictated by the Hierarchical Cell Structure. *ACS Applied Materterials & Interfaces*, 6, 9760-9767. <http://dx.doi.org/10.1021/am5021793>.
239. Meyers, M. A. (1994). *Dynamic behavior of materials*. hoboken: john wiley & sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470172278>.
240. Milner, H. R. (2009). Sustainability of engineered wood products in construction. En J. M. Khatib (Ed.). *Sustainability of Construction Materials* (pp. 184-212). Cambridge: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, <https://doi.org/10.1533/9781845695842.184>.
241. Mitchell G., Gaspar F., Mateus A., Mahendra V., y Sousa D. (2018). Advanced Materials from Forests. En L. Martínez, O. Kharissova, B. Kharisov (Eds). *Handbook of Ecomaterials*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_189-1.
242. Mott, P. H., & Roland, M. (2002). Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1782-1790.
243. Murat, K. & Gulser, C. (2006). Compression, cleavage, and shear resistance of composite construction materials produced from softwoods and hardwoods. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(4), pp. 3673-3678.
244. Mvondo, R. R. N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D. D., & Nkeng, E.G. (2017). Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. *Results in Physics*, 7, 2096-2103. doi: 10.1007/s00231-019-02795-8
245. Na, B., Wang, Z., Wang, H., y Lu, X. (2014). Wood-cement compatibility review. *Wood Research*, 59(5), 813-626. <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>.
246. Nadir, Y., & Nagarajan, P. (2014). The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber Wood. *Construction and Building Materials*, 55, 398-405. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032

247. Nadir, Y., Nagarajan, P., & Midhun, A. J. (2014). Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and Iosipescu shear test. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(6), 749-758. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0842-4>
248. Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., y Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, 547-555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>.
249. Nakano, T. (2003). Effects of Cell Structure on Water Sorption for Wood. *Holzforschung*, 57, 213-218.
250. Naruse, K. (2003). Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *Journal of Wood Science*, 49(6), 479-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-003-0515-0>.
251. Németh, R., Horváth, N., Fodor, F., Báder, M., & Bak, M. (2020). Wood Modification for Under-Utilized Hardwood Species. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 505, 012017.
252. Niederwestberg, J., Zhou, J., y Chui, Y.H. (2018). Mechanical Properties of Innovative, Multi-Layer Composite Laminated Panels. *Buildings*, 8, 142. <https://doi.org/10.3390/buildings8100142>.
253. Niklas, K. J., and Spatz, H. C. 2010. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, 97(10), pp. 1587-1594.
254. Nopens, M., Riegler, M., Hansmann, C., & Krause, A. (2019). Simultaneous change of wood mass and dimension caused by moisture dynamics. *Scientific Reports*, 9, 10309.
255. Nowak, T. P., Jasieńko, J., and Czepiżak, D. 2013. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 197-206.
256. O. Perçin, S. D. Sofuoğlu y O. Uzun, “Effects of boron impregnation and heat treatment on some mechanical properties of oak (*Quercus petraea* Liebl.) wood”, *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 3963-3978, 2015.
257. Otten, K. A., Brischke, C., and Meyer, C. 2017. Material moisture content of wood and cement mortars-Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. In: *Construction and Building Materials*, 153, 640-646. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.090>.

258. O'Leary, P., & Hodges, P. A. (2001). The relationship between full penetration uptake and swelling of different fluids. *Wood Science and Technology*, 35(3), 217-227.
259. Olsson, A., & Källsner, B. (2015). Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis. *Materials and Structures*, 48(4), 977-985. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0208-0>.
260. Olsson, A., & Källsner, B. 2013. Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis. *Materials and Structures*, Vol. 48, No. 4, pp. 977-985.
261. Ormondroyd, G. A., Spear, M., & Curling, S. F. (2015). Modified wood: review of efficacy and service life testing. *constructions materials, proceedings of the institution of civil engineers*, paper 1400072. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.14.00072>.
262. Ozyhar, T., Hering, S., Sanabria, S. J., & Niemz, P. (2013). Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. *Wood Science and Technology*, 47(2), 329-341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
263. P. Dietsch, S. Franke, B. Franke, A. Gamper y S. Winter, "Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 5, no. 2, pp. 115-127, abr. 2015. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>.
264. Papadopoulos, A. N. (2020b). Advances in Wood Composites II. *Polymers*, 20, 1-4. <https://doi.org/10.3390/polym12071552>.
265. Pauta solano, J.f., y Sánchez Ramírez, M. L. (2014, noviembre). Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo formula SAE. *Diseño y Construcción de la Carrocería de un Vehículo de Competencia Tipo Formula SAE*. Cuenca, Azuay, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana.
266. Pereira Acosta, A., Römer Schulz, H. R., Techera Barbosa, K., Spiering Zanol, G., Gallio, E., de Avila Delucis, R., & Gatto, D. A. (2020). Dimensional stability and colour responses of *Pinus elliottii* wood subjected to furfurylation treatments. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(3), 303-310.
267. Perré, P., Almeida, G., Ayouz, M., & Frank, X. (2016). New modelling approaches to predict wood properties from its cellular structure: image-based representation and meshless methods. *Annals of Forest Science*, 73(1), 147-162. doi: 10.1007/s13595-015-0519-0
268. Pizzi, A., Papadopoulos, A. N., y Policardi, F. (2020). Wood Composites and Their Polymer

- Binders. *Polymers*, 12, 1115. <https://doi.org/10.3390/polym12051115>.
269. Qi, Y., Xiong, W., Liu, W., Fang, H., y Lu, W. (2015). Experimental Study of the Flexural and Compression Performance of an Innovative Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Polymer-Wood Composite Profile. *PLoS ONE*, 10(10), e0140893. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0140893>.
 270. Qiao, Q., Yang, Z., y Mou, B. (2020). Experimental study on axial compressive behavior of CFRP confined square timber filled steel tube stub columns. *Structures*, 24, 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.007>.
 271. Quesadas-Solís. K., Alvarado-Aguilar. P., Sibaja-Ballesteros, R., y Vaega-Baudrit, J. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 6, 157-179.
 272. R. Gonçalves, A. J. Trinca y B. P. Pellis, “Elastic constants of wood determined by ultrasound using three geometries of specimens”, *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 269-287, mzo. 2014. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0598-8>.
 273. R. Gonçalves, A. J. Trinca y G. C. dos Santos Ferreira, “Effect of coupling media on velocity and attenuation of ultrasonic waves in Brazilian Wood”, *Journal of Wood Science*, vol. 57, no. 4, pp. 282-287, 2011. DOI 10.1007/s10086-011-1177-y
 274. R. Viala, V. Placet y S. Cogan, “Simultaneous non-destructive identification of multiple elastic and damping properties of spruce tonewood to improve grading”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 42, pp. 108-116, mzo.-abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.004>
 275. Raftery, G. M., y Rodd, P. D. (2015). FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. *Construction and Building Materials*, 91, 116-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026>.
 276. Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U. (...) y Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>.
 277. Rangavar, H. (2017). Wood-Cement Board Reinforced with Steel Nets and Woven Hemp Yarns: Physical and Mechanical Properties. *Drvna Industrija*, 68(2), 121-128. <http://dx.doi.org/10.5552/drind.2017.1631>.
 278. Reis, J. P., De Moura, M. F. S. F., Silva, F. G. A., y Dourado, N. (2018). Dimensional

- optimization of carbon-epoxy bars for reinforcement of wood beams. *Composites Part B*, 139, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.046>.
279. Rescalvo, F. J., Valverde-Palacios, I., Suarez, E., and Gallego, A. 2017. Experimental Comparison of Different Carbon Fiber Composites in Reinforcement Layouts for Wooden Beams of Historical Buildings. *Materials*, 10(10), pp. 1113-1132.
 280. Rescalvo, F. J., Valverde-Palacios, I., Suarez, E., and Gallego, A. 2018. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. *Composite Structures*, 186, pp. 29-38.
 281. Ribeiro, A. S., De Jesus, A. M. P., Lima, A. M., & Lousada, J. L. C. (2009). Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood. *Construction and Building Materials*, 23, 2738-2745. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.042
 282. Richter, C. (2015). *Wood Characteristics. Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation*. Heidelberg: Springer.
 283. Richter, H. G., Grosser, D., Heinz I., & Gasson, P. E. (2004). IAWA list of microscopic features for softwood identification. *IAWA Journal*, 25(1), 1-70. doi: 10.1163/22941932-90000349
 284. Riggio, M., D'Ayala, D., Parisi, M. A., and Tardini, C. 2018. Assessment of heritage timber structures: Review of standards, guidelines and procedures. *Journal of Cultural Heritage*, 31, pp. 220-235.
 285. Rocco, F. A., Christoforo, A. L., Varanda, L. D., Chahud, E., Almeida, V., & Nunes, L. A. M. 2017. Shear and Longitudinal Modulus of Elasticity in Wood: Relations Based on Static Bending Tests. *Acta Scientiarum. Technology*, Vol. 39, No. 4, pp. 433-437.
 286. Romagnoli, M., Cavalli, D., & Spina, S. (2014). Wood Quality of Chestnut: Relationship between Ring Width, Specific Gravity, and Physical and Mechanical Properties. *BioResources*, 9(1), 1132-1147.
 287. Roohnia, M., & Kohantorabi, M. 2015. Dynamic methods to evaluate the shear modulus of Wood. *BioResources*, Vol. 10, No. 3, pp. 4867-4876.
 288. Rowell, R. M. (2007). Chemical Modification of Wood. In: *Handbook of Engineering Biopolymers. Homopolymers, Blends, and Composites*. Fakirov, S., & Bhattacharyya, D. (Editors). pp: 673-691.
 289. S. A. Ahmed y S. Adamopoulos, "Acoustic properties of modified wood under different

- humid conditions and their relevance for musical instruments”, *Applied Acoustics*, vol. 140, pp. 92-99, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.017>.
290. S. Gao, X. Wang y L. Wang, “Modeling temperature effect on dynamic modulus of elasticity of red pine (*Pinus resinosa*) in frozen and non-frozen states”, *Holzforschung*, vol. 69, no. 2, pp. 233-240, 2015. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0048>.
 291. Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., y Paridah. M. T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 106, 149-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>.
 292. Sáenz Reyes, J. T., Muñoz Flores, H. J., and Rueda Sánchez, A. 2011. Especies Promisorias de Clima Templado para Plantaciones Forestales Comerciales en Michoacán. Libro Técnico Núm. 10. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 213 pp.
 293. Sáenz, R., J. T., Muñoz, F., H. J., & Rueda, S., A. (2011). *Especies Promisorias de Clima Templado para Plantaciones Forestales Comerciales en Michoacán*. Uruapan: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
 294. Sahin, H. T. (2010). Experimental determination of the anisotropic swelling and water sorption properties of chestnut wood. *Wood Research*, 55(1), 33-40.
 295. Sanabria, S. J., Furrer, R., Neuenschwander, J., Niemz, P., and Sennhauser, U. 2011. Air-coupled ultrasound inspection of glued laminated timber. *Holzforschung*, 65(3), pp. 377-387.
 296. Sandberg, D., Haller, P., y Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products, *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64-88. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>.
 297. Sandberg, D., Kutnar, A., y Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest*, 10, 895-908. <http://dx.doi.org/10.3832/ifor2380-010>.
 298. Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65, 36-47l.
 299. Saxena, A., Schaffer, J., Antolovic, S., y Sanders, T. (2000). Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería México: Cecsa.

300. Schneid, E., Gonzalez de Cademartori, P. E., & Gatto, D. (2014). The effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of *Luehea divaricata* hardwood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(4), 413-422.
301. Schober, K. U., Harte, A. M., Kliger, R., Jockwer, R., Xu, Q., & Chen, J. F. (2015). FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*, 97, pp. 106-118.
302. Schorr, D., & Blanchet, P. (2020). Improvement of White Spruce Wood Dimensional Stability by Organosilanes Sol-Gel Impregnation and Heat Treatment. *Materials*, 13(4), 973-987.
303. Schubert, S., Gsell, D., Dual, J., Motavalli, M., & Niemz, P. (2009). Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforschung*, 63(1), 107-112. doi: 10.1515/HF.2009.028.
304. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1982). Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de Cooperación Científica y Técnica, México-Yugoslavia: SARH. SFF.
305. Shirley Kalamis Gracia Castillo. Análisis de laminados de material compuesto con precarga en su plano y sometido a impacto. Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
306. Shukla, S. R., & Kandem, D. P. (2010). Dimensional stability of nine tropical hardwoods from Cameroon. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(4), 389-396.
307. Silva G., J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda, R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. G., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., & Richter H. G. (2013). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México*. México: Comisión Nacional Forestal.
308. Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., & Richter, H. G. (2010). *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*. México: Comisión Nacional Forestal.
309. Simpson, W., and TenWolde, A. 2010. Physical Properties and Moisture Relations of Wood. Chapter 3. In: Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook-Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-190>

310. Singh, N., Rana, A., y Badhotiya, G. K. (2021). Manufacturing processes for the development of engineered wood – A mini-review. *Materials Today: Proceedings*, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.612>.
311. Slávik, R., Čekon, M., and Štefaňák, J. 2019. A Nondestructive Indirect Approach to Long-Term Wood Moisture Monitoring Based on Electrical Methods. In: *Materials*, 12, 2373; <https://doi.org/10.3390/ma12152373>
312. Smulski, S. (1997). *Engineered Wood Products: A Guide for Specifiers, Designers & Users*. Madison:PFS Research Foundation.
313. Song, J., Chen, C., Wang, C., Kuang, Y., Li, Y., Jiang, F., (...) y Hu, L. (2017). Super flexible Wood. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(28), 23520-23527. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06529>.
314. Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., (...) y Hu, L. (2018). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*, 554, 224-239. <https://doi.org/10.1038/nature25476>.
315. Sotayo, A., Bradley, D.F., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-houjeyri, I., Harte, A., Mehra, S., O’Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., & Guan, Z. (2020). Review of State of the Art of Dowel Laminated Timber Members and Densified Wood Materials as Sustainable Engineered Wood Products for Construction and Building Applications. *Developments in the Built Environment*, 1, 100004.
316. Sotomayor C., J. R., Carmona D., I., Cervantes M., I., Garduño S., D., Jiménez G., D. Z., Lemus D., R., Maldonado C., D., Pérez T., A., Vaca H., M. A., & Valdez V., O. (2015). Madera laminada de *Pinus pseudostrobus*. Caracterización dinámica con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 11(3), 4-34.
317. Sotomayor Castellanos, J. R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 65 p. ISBN: 978-607-00-9036-3. https://www.academia.edu/12448352/Banco_FITECMA_de_caracter%C3%ADsticas_f%C3%ADsico_mec%C3%A1nicas_de_maderas_Mexicanas
318. Sotomayor C., J. R., Macedo A., I., & Chávez G., H. L. (2020). Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 282-299.

319. Sotomayor Castellanos, J. R. (2016). Características higroscópicas de la madera de *Pinus pseudostrobus*. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 12(2), 4-33.
320. Sotomayor Castellanos, J. R. (2017). Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Pruebas de higroscopía. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(2), 4-21.
321. Sotomayor Castellanos, J. R. (2018). Densidad y módulos dinámicos por vibraciones transversales de madera sólida y laminada de tres especies tropicales. *Tecnociencia*, 20(2), 71-
Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/331101383_Densidad_y_modulos_dinamicos_por_vibraciones_transversales_de_madera_solida_y_laminada_de_tres_especies_tropicales
322. Sotomayor Castellanos, J. R. (2018). Índices materiales en flexión estática de maderas mexicanas con potencial para uso en la construcción. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 45-52. Recuperado de <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/revistasomim/index.php/IMTyD/article/view/131/85>.
323. Sotomayor Castellanos, J. R. (2019). Módulo dinámico longitudinal determinado por ultrasonido en madera de tres angiospermas sólida y laminada. *Entreciencias*, 7(21), 23-35. doi: 10.22201/enesl.20078064e.2019.21.68151
324. Sotomayor Castellanos, J. R. (2019). Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 15(1), 3-64. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera.
325. Sotomayor Castellanos, J. R. (2020). Caracterización mecánica por ondas de esfuerzo de la madera laminada de tres especies angiospermas. *Brazilian Journal of Wood Science*, 11(1), 32-41. doi: 10.12953/2177-6830/rcm.v11n1p32-41
326. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-29.
327. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014a). Características físicas de 12 maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(1), 4-35.

328. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014b). Caracterización físico-mecánica e indicadores de calidad de la madera de *Lysiloma* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(3), 4-65.
329. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ruiz Aquino, F. (2017). Caracterización dinámica de madera laminada. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(3), 22-44. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321979545_Caracterizacion_dinamica_de_madera_laminada
330. Sotomayor Castellanos, J. R., Adachi, K., Iida, R., & Hayashi, T. (2020). Módulos de elasticidad y de ruptura de madera laminada de tres especies tropicales. *Acta Universitaria*, 29, 1-15. doi: 10.15174/au.2019.2178
331. Sotomayor castellanos, J. R., Adachi, K., Iida, R., & Hayashi, T. (2021). Verificación con ultrasonido del tratamiento de densificado en ocho maderas mexicanas. *ingeniería mecánica*, 24(1), e620. <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/648/1149>.
332. Sotomayor Castellanos, J. R., Ávila Calderón, L. E. A., y Fuentes Salinas, M. (2021). Características higroscópicas de las maderas *Spathodea campanulata*, *Fraxinus americana* y *Albizia plurijuga* impregnadas con boro. *Revista Ciencia UNEMI*, 14(35), 10-25.
333. Sotomayor Castellanos, J. R., Carmona Delgado, I., Cervantes Móreles, I., Garduño Suárez, D., Jiménez Guzmán, D. Z., Lemus Durán, R., Maldonado Correa, D., Pérez Tello, A., Vaca Hernández, M. A., & Valdez Velázquez, O. (2015). Madera laminada de *Pinus pseudostrobus*. Caracterización dinámica con métodos no destructivos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 11(3), 4-34. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/288181223_Madera_laminada_de_Pinus_pseudostrobus_Caracterizacion_dinamica_con_metodos_no_destructivos_Laminated_wood_of_Pinus_pseudostrobus_Dynamic_characterization_by_non-destructive_methods
334. Sotomayor Castellanos, J. R., García Mariscal, J. L., Moya Lara, C. E., & Olguín Cerón, J. B. (2010a). Higroscopía y anisotropía de la madera de *Pinus michoacana*, *Pinus douglasiana* y *Pinus pringlei*. Higrocontracción, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad dinámico. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 6(3), 3-32. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/261099839_Higroscopia_y_anisotropia_de_la_madera_de_Pinus_michoacana_Pinus_douglasiana_y_Pinus_pringlei_Higrocontraccion_velocid

ad_del_ultrasonido_y_modulo_de_elasticidad_dinamico.

335. Sotomayor Castellanos, J. R., Guridi Gómez, L. I., & García Moreno, T. (2010b). Características acústicas de la madera de 152 especies mexicanas. Velocidad del ultrasonido, módulo de elasticidad, índice material y factor de calidad. Base de datos. *Investigación e Ingeniería de la Madera*. 6(1), 3-32. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/261064568_Caracteristicas_acusticas_de_la_madera_de_152_especies_mexicanas_Velocidad_del_ultrasonido_modulo_de_elasticidad_indice_material_y_factor_de_calidad_Base_de_datos.
336. Sotomayor Castellanos, J. R., Macedo Alquicira, I., y Chávez García, H. L. (2020). Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 282-299. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.624.15>.
337. Sotomayor Castellanos, J. R., Tinoco Campos, L. M., & Raya González, D. (2020). Características higroscópicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* y *Cedrela odorata*. *Ciencia Nicolaita*, 79(1), 75-93.
338. Sotomayor Castellanos, J. R., y Correa Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*. 24(1): 1-19. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>.
339. Sotomayor Castellanos, J. R. (2016). Módulos de rigidez dinámicos de siete maderas mexicanas determinados por vibraciones en torsión. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 125-134. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.03.008>.
340. Sotomayor, J. R. 2015. Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas. Morelia, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
341. Sotomayor, J. R. 2016. Módulos de rigidez dinámicos de siete maderas mexicanas determinados por vibraciones en torsión. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Vol. 22, No. 2, pp. 125-134.
342. Sotomayor, J. R. 2018a. Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, Vol. 9, No. 48, pp. 1-23.
343. Sotomayor, J. R. 2018b. Índices materiales en flexión estática de maderas mexicanas con potencial para uso en la construcción. *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, Vol. 6,

No. 2, No. 45-52.

344. Sotomayor, J. R., y Villaseñor, J. M. 2016. Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, Vol. 13, No. 33, pp. 20-28.
345. Sousa, H. S., Sørensen J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., y Lourenço, P. B. (2013). On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures. *Engineering Structures*, 56, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.014>.
346. Spycher, M., Schwarze, F.W.M.R., and Steiger, R. 2008. Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Science and Technology*. 42(4), pp. 325-342.
347. Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D., y Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 97, 90-105.
348. Stoeckel, F., Konnerth, J., y Gindl-Altmutter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 45, 32-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>.
349. Sun, W., Shen, H., y Cao, J. (2016). Modification of wood by glutaraldehyde and poly (vinyl alcohol). *Materials and Design*, 96, 392-400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.044>.
350. Tamarit Urias, J. C. and López Torres, J. L. 2007. Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Puebla: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. ISBN: 970430126X. https://www.researchgate.net/publication/339936736_XILOTECNOLOGIA_DE_LOS_PRINCIPALES_ARBOLES_TROPICALES_DE_MEXICO
351. Tamarit Urias, J. C., & Fuentes Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 155-164.
352. Téllez S., C., Herrera F., M. A., & Rutiaga Q., J. G. (2009). Anatomía, Física y Mecánica de la madera de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), pp. 15-21.
353. Tippner, J., Hrivnák, J., and Kloiber, M. 2016. Experimental Evaluation of Mechanical

- Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1), pp. 503-518.
354. Tiriyaki, S., Bardak, S., Aydın, A., & Nemli, G. (2016). Analysis of volumetric swelling and shrinkage of heat treated woods: experimental and artificial neural network modeling approach. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 18(3), 477-492.
355. Toğay, A., Döngel, N., Söğütlü, C., Ergin, E., Uzel, M., y Güneş, S. (2017). Determination of the Modulus of Elasticity of Wooden Construction Elements Reinforced with Fiberglass Wire Mesh and Aluminum Wire Mesh. *Bioresources*, 12(2), 2466-2478. <http://dx.doi.org/10.15376/BIORES.12.2.2466-2478>.
356. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995a). Mexican tropical hardwoods. Dimensional stability. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 277-280.
357. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995b). Mexican tropical hardwoods. Stepwise shrinkage and transverse shrinkage anisotropy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 155-157.
358. U. Dackermann, R. Elsener, J. Li y K. Crews, “A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood”, *Construction and Building Materials*, vol. 102, pp. 963-976, en. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>
359. U. G. Wegst, “Wood for sound”, *American Journal of Botany*, vol. 93, no. 10, pp. 1439-1448, oct. 2006. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439>.
360. V. Bucur y N. F. Declercq, “The anisotropy of biological composites studied with ultrasonic technique”, *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e829-e831, dic. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.203>
361. Van Roy, N., Verstrynge, E., and Van Balen, K. 2018. A preventive conservation approach for historical timber roof structures. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 8(2), pp. 82-94.
362. Van Blokland J., and Adamopoulos, S. 2022. Electrical resistance characteristics of thermally modified wood. In: *European Journal of Wood and Wood Products*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01813-7>
363. Villarreal, E., Celedón, E. A., Buendía, C. A., & García, L. A. (2009). Medidor de espesores para materiales metálicos usando ultrasonido. *Umbral Científico*, 14, pp. 130-142.
364. W. Hidayat, Y. Qi, J. H. Jang, F. Febrianto y N. H. Kim, “Effect of mechanical restraint on the properties of heat-treated *Pinus koraiensis* and *Paulownia tomentosa* Woods”,

- BioResources*, vol. 12, no. 4, pp. 7539-7551, 2017.
365. Wagner, T. K. Bader, D. Auty y K. de Borst, “Key parameters controlling stiffness variability within trees: a multiscale experimental-numerical approach”, *Trees*, vol. 27, no. 1, pp. 321-336, febr. 2013. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0801-9>
 366. Wang, B., Bachtiar, E. V., Yan, L., Kasal, B., y Fiore, V. (2019). Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams: An Experimental Study. *Polymers*, 11(8), 1255-1270. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11081255>.
 367. Wang, X., Sauter, U. H., & Ross, R. J. (Editors). (2019). Proceedings of the 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. General Technical Report FPL-GTR-272. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 724 p.
 368. Wang, Z., Xie, W., Wang, Z., & Cao, Y. 2018. Strain method for synchronous dynamic measurement of elastic, shear modulus and Poisson’s ratio of wood and wood composites. *Construction and Building Materials*, Vol. 182, pp. 608-619.
 369. Weaver, W. Jr., Timoshenko, S. y Young, D. H. (1990). *Vibration problems in engineering*. New York: Wiley.
 370. Wei, J., Rao, F., Zhang, Y., Yu, W., Hse, C., y Shupe, T. (2019). Laminating wood fiber mats into a densified material with high performance. *Materials Letters*, 253, 358-361. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.06.097>.
 371. Wheeler, E. A., Baas P., & Gasson, P. E. (2007). IAWA list of microscopic features for hardwoods identification. *IAWA Bulletin*, 10(3), 219-332. doi: 10.1163/22941932-90000496.
 372. Winandy, J. E., & Kamke, F. A., (Eds.) (2004). *Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop; Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-149*. Madison: Forest Service, Forest Products Laboratory.
 373. Xu, H., Li, Q., Xu, Q., Bao, Z., Wang, L., and Xing, T. 2019. Effects of Brown-rot Decay on the Electrical Resistance of Wood and its Mechanism. In: *BioResources*, 14(3), 6134-6145. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2019/06/BioRes_14_3_6134_Xu_XBWX_Effects_Brown_rot_Decay_Electr ic_Resistance_Wood_14994.pdf.
 374. Y. Miyoshi, K. Kojiro y Y. Furuta, “Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tensión”, *Journal of Wood Science*,

- vol. 64, no. 5, pp. 509-514, oct. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1730-z>.
375. Yao, X., Shen, C., & Xu, S. (2019). The effects of coupling/grafting modification of wood fiber on the dimensional stability, mechanical and thermal properties of high-density polyethylene/wood fiber composites. *Materials Research Express*, 6(11), 115328.
 376. Yelle D. J., y Stirus, A. M. (2016). Influence of Anatomical, Physical, and Mechanical Properties of Diffuse-Porous Hardwoods on Moisture Durability of Bonded Assemblies. General Technical Report FPL-GTR-244. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-244>.
 377. Yoshihara, H. 2012. Shear modulus and shear strength evaluation of solid wood by a modified ISO 15310 square-plate twist method. *Drvna Industrija*, Vol. 63, No. 1, pp. 51-55.
 378. Zelinka, S. L., Passarini, L., Colon Quintana, J. L., Glass, S. V., Jakes, J. E., and Wiedenhoef, A. C. 2016. Cell Wall Domain and Moisture Content Influence Southern Pine Electrical Conductivity. In: *Wood and Fiber Science*, 48, 54-61. DOI: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2016/fpl_2016_zelinka004.pdf.
 379. Z. Liu, Z. Zhang y R. O. Ritchie, “Structural orientation and anisotropy in biological materials: functional designs and mechanics”, *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 10, p. 1908121, mzo. 2020. <https://doi.org/10.1002/adfm.201908121>
 380. Z. R. Zhou, M. C. Zhao, M. Gong y Z. Wang, “Variation of density and dynamic modulus of elasticity of poplar veneer and its impact on grade yield”, *BioResources*, vol. 12, no. 1, pp. 1344-1357, 2017.
 381. Zhang, T., Bai, S. L., Bardet, S., Alm  ras, T., Thibaut, B., & Beauch  ne, J. (2011). Radial variations of vibrational properties of three tropical woods. *Journal of Wood Science*, 57(5), 377-386. doi: 10.1007/s10086-011-1189-7.
 382. Zhang, J-Y., and Shen, Q. 2019. Processing natural wood into bulk conducting materials. In: *SN Applied Sciences*, 1, 1579. DOI: <http://doi.org/10.1007/s42452-019-1572-3>
 383. Zhou, X. Y., Wang, Q., Li, J. H., & Zhang, Z. F. (2011). Comparative Study on Mechanics of Galvanized Steel Wire Mesh and GFRP Reinforced Wood for Timberwork on Chinese Plantation. *Applied Mechanics and Materials*, 71, pp. 3280-3283.
 384. Zhu, H., Luo, W., Ciesielski, P. N. Fang, Z., Zhu, J. Y., Henriksson, G., (...) y Hu, L. (2016). Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications. *Chemical Reviews*, 116, 9305-9374.

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>.

385. Zmijewski T., & Wojtowicz-Jankowska, D. (2017). Timber - material of the future - examples of small wooden architectural structures. *iop conf. series: materials science and engineering*, 245(8), 082019 doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/8/082019>.

7. SINTESIS GENERAL

La tesis titulada “Caracterización mecánica de madera sólida y multimaterial madera-adhesivo-malla” es una investigación con contribución en el área los materiales compuestos de madera para los usos diversos, con una disminución o aumento de la variabilidad del material (madera) y/o especie.

Se implemento el método no destructivo por medio de las pruebas de torsión dinámica, de ultrasonido, de vibraciones transversales, ondas de esfuerzo.

En el capítulo de Investigaciones se desarrollaron temas que abordan la variabilidad, la anisotropía, la densidad y la higroscopia.

Se determinaron módulos de rigidez, los módulos elásticos, el módulo dinámico, la velocidad de ultrasonido y frecuencias (vibraciones transversales y longitudinales) de las maderas sólidas y multimaterial con diferentes especies.

Los resultados obtenidos en la investigación, las conclusiones y las metas planteadas, satisfacen el objetivo general y los objetivos particulares de la investigación.

Caracterizar la madera sólida y el multimaterial elaborado de una misma especie, empleando métodos no destructivos.

- Elaborar probetas de madera sólida y multimaterial empleando tres especies o más.
- Determinar la densidad, la velocidad de onda y/o la frecuencia en las direcciones radial, tangencial y longitudinal en la madera sólida y multimaterial.
- Determinar el módulo dinámico y los coeficientes de variación.
- Calcular las relaciones de anisotropía en la madera sólida y el multimaterial.

Recomendaciones

Como seguimiento de la investigación a futuro se propone recomendaciones para llevar a cabo la línea de investigación de la madera sólida y del multimaterial con el enfoque propuesta en la investigación.

- Realizar diferentes investigaciones con distintas configuraciones de probetas, secciones, espesores y especies, así como emplear otros tipos de pruebas no destructivas y destructivas.
- Crear configuraciones en forma de viguetas con la metodología propuesta en la investigación y aplicar las técnicas de ensayos destructivo y no destructivos
- Implementar distintos refuerzos en el multimaterial como la fibra de vidrio, fibras textiles, fibra de carbono, la malla de acero con calibre diferente.
- Analizar la estructura anatómica y las propiedades físico-químicas del adhesivo y de la malla que intervienen en la velocidad y en el módulo dinámico. Así como la aplicación de adhesivos a base de resinas epoxicas, resinas poliéster y vinilester, fenol folmaldehído.
- Emplear el método de elementos finitos en el estudio mecánico de la madera sólida y multimaterial.
- Ensayos de delaminado de la madera sólida y del multimaterial en ambas direcciones.
- Pruebas mecánicas de flexión y compresión paralela y perpendicular a la fibra de la madera sólida y del multimaterial.

8. ANEXOS

8.1. Constancia Estancia Doctoral

Sevilla, España Septiembre 2019

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones
Director: Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería y
Tecnología de la Madera
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
P R E S E N T E

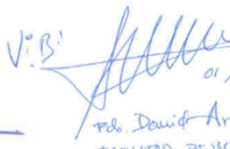
Asunto: Carta de terminación de estancia doctoral

La Universidad de Sevilla, España en la Facultad de Bellas Artes, en colaboración con el grupo de investigación, HUM-461: Conservación y Restauración de Obras de Arte a mi cargo hago de su conocimiento que el alumno doctorando **Israel Macedo Alquicira** que cursa el Programa en Ciencias y Tecnología de la Madera impartido en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, forma parte de su tema de investigación que lleva por título “Madera Laminada y Multimaterial- Adhesivo Malla, como Sustitutos de Madera Sólida en la Restauración de Edificios Históricos” ha concluido de manera satisfactoria con el plan de trabajo estipulado revisado y aprobado por (por la Facultad de Bellas Artes de Sevilla, España, la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Madera Morelia, México y por la Facultad de Arquitectura Morelia, Mexico), el cual es posible leer en el oficio número 76/ 2019 emitido por la institución de origen antes mencionada en donde se enlistan las actividades que fueron realizadas durante su estancia.

Dando terminada su estancia doctoral de este año 2019, la cual abarcó un periodo de 30 días.

NOTA: debido a cuestiones de tipo legislativo y de autoría en España, no es posible brindar imágenes fotográficas de las obras de carácter artístico y de algunos laboratorios y talleres.

Fdo. David Arquillo Avilés

V. B. 
01/09/20
UNIVERSIDAD DE SEVILLA
FACULTAD DE BELLAS ARTES
DEPARTAMENTO DE PINTURA
UNIVERSIDAD DE SEVILLA
PROFESOR DEL DEPARTAMENTO DE PINTURA
FACULTAD DE BELLAS ARTES
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

8.2. Constancias de cursos

8.2.1. Curso de Microscopia electrónica de barrido. (2018). Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, México.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

Otorga la presente

Constancia

a:

Israel Macedo Alquicira

Por la acreditación satisfactoria del curso:

**Microscopía Electrónica de
Barrido**

Impartido de manera presencial, con una duración de
20 horas, en el periodo comprendido del 10 al 14 de
Diciembre.

Morelia, Michoacán, a 14 de Diciembre de 2018.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"


Dra. Diana Tamara Martínez Ruiz
Directora Escuela Nacional de Estudios
Superiores Unidad Morelia

8.2.3. 13º Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación y Séptimo Encuentro de Jóvenes Investigadores. (2018). Morelia, México.



**El Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, a través del
Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado,**
otorgan la presente

CONSTANCIA

A: ISRAEL MACEDO ALQUICIRA

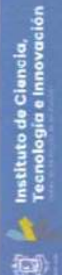
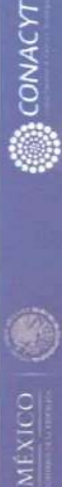
Por su participación como asistente

En el marco de las actividades académicas del **13º Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación y el Séptimo Encuentro de Jóvenes Investigadores** del Estado de Michoacán.

Morelia, Michoacán; a 19 de octubre de 2018.



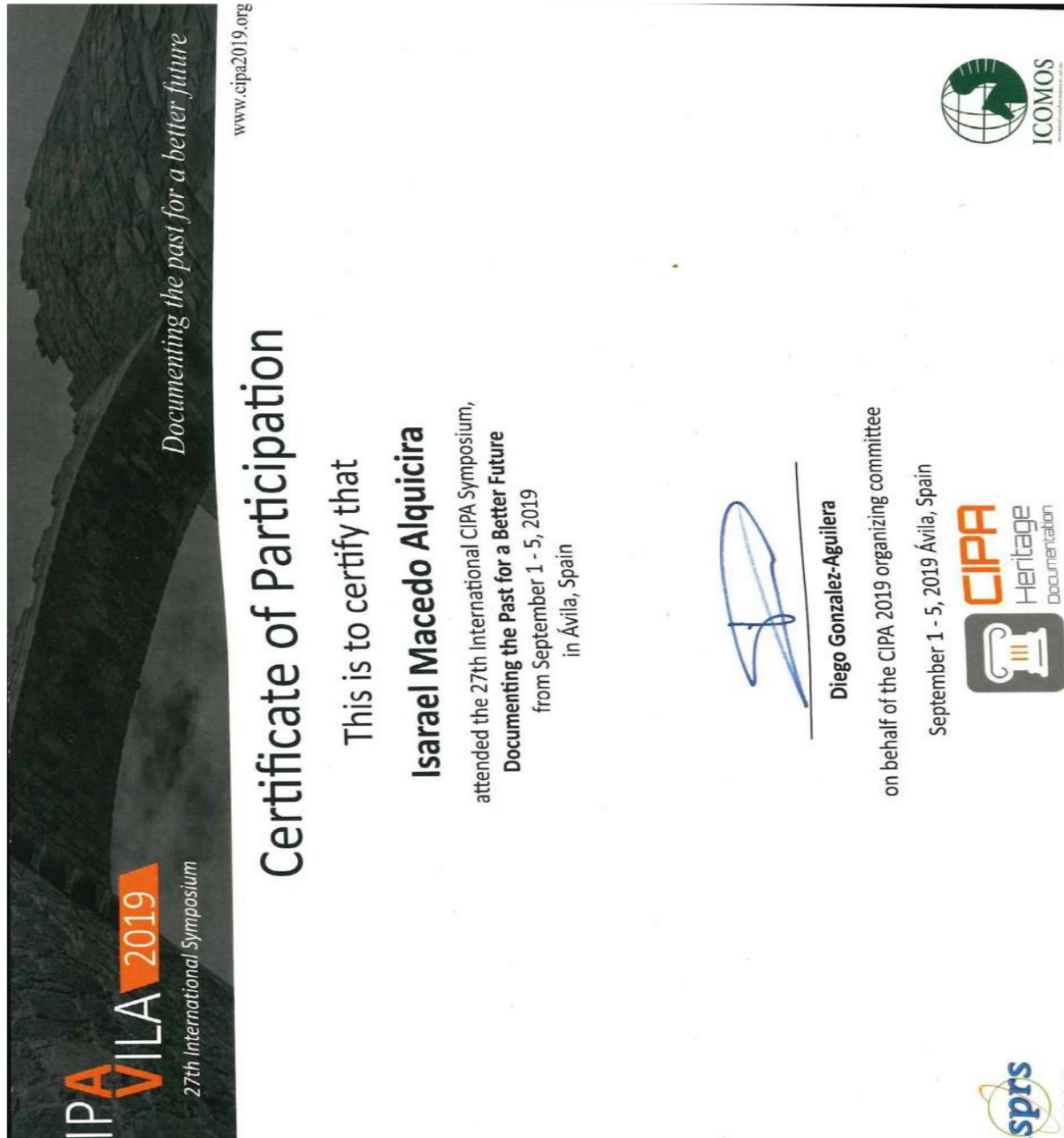
Dr. José Luis Montañez Espinosa
Director General del Instituto de Ciencia,
Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán



8.2.4. Foro de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Madera. (2018). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo de México. Morelia, México.



8.2.5. Congreso Internacional CIPA-ICOMOS-ISPRS. (2019). Ávila, España.



8.2.6. Congreso Internacional de Jóvenes Investigadores del Patrimonio Arquitectónico. (2019). Córdoba, España.



Propuesta de los Directores del Congreso, Dña. Paula Revenga Domínguez y D. Carlos Hiriart Pardo

Se otorga la presente **CONSTANCIA** a:

D. Israel Macedo Alquicira

Por su participación en el III Congreso Internacional de Jóvenes Investigadores del Patrimonio Arquitectónico y celebrado los días 11, 12 y 13 de diciembre de 2019 (modalidad virtual), presentando la comunicación titulada
"La importancia y aplicación de la madera laminada
en la restauración de los edificios de carácter histórico".

Directora Académica

Paula Revenga Domínguez

Director Académico

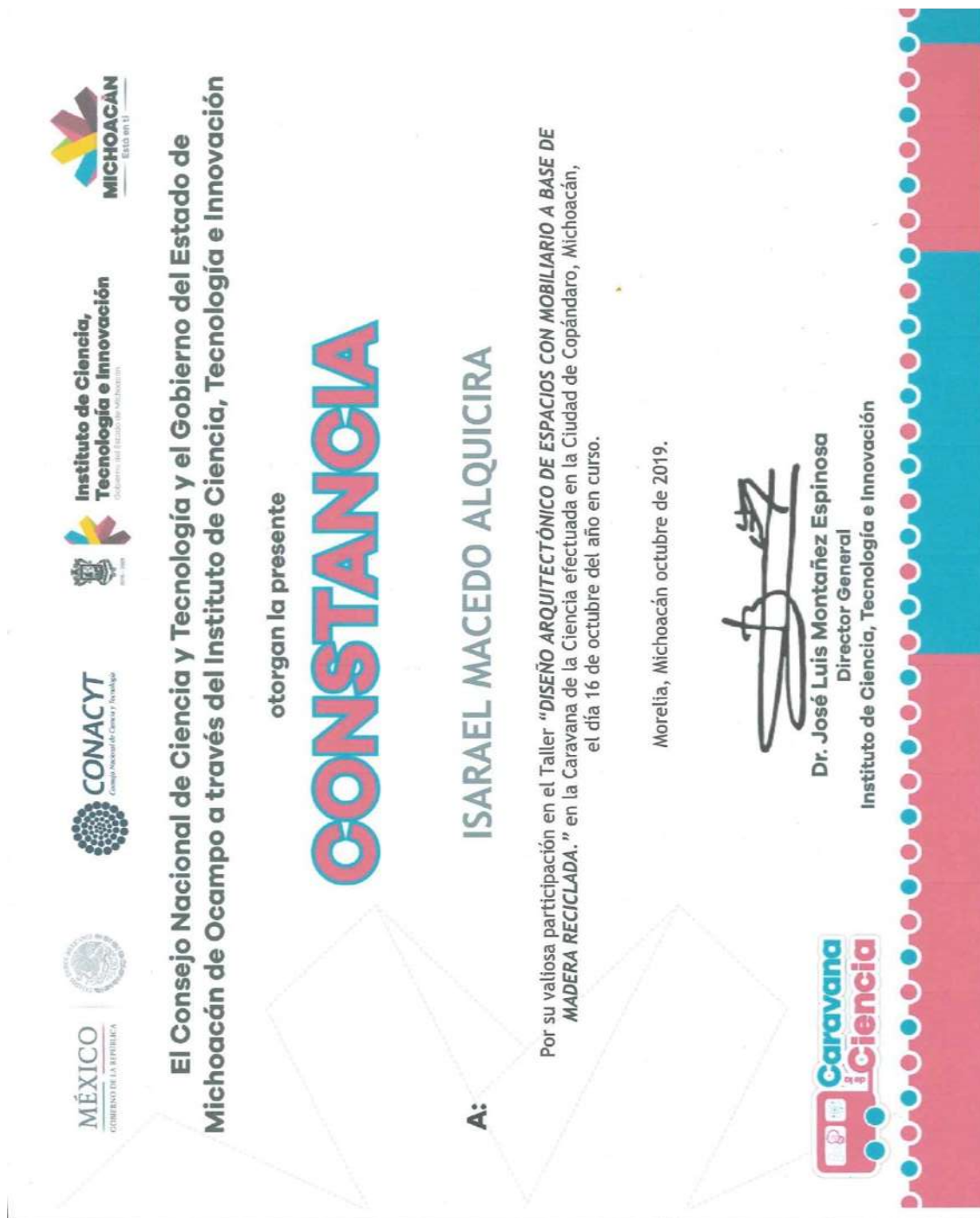
Carlos Alberto Hiriart Pardo

Córdoba a 16 de diciembre de 2019

8.2.7. XII Jornada Académica Forestal, Tecnológica de la Madera y Posgrado (2019). Universidad de la Sierra Juárez. Oaxaca, México.



8.2.8. Caravana de la Ciencia. (2019). Morelia, México.



8.2.9. Tianguis de la Ciencia. (2019). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Coordinación de Investigación Científica a través del
Departamento de Comunicación de la Ciencia

otorgan la presente

CONSTANCIA

a
Israel Macedo Alquicira

por su participación como:

COLABORADOR DEL TALLER

“APLICACIÓN DE LA MADERA PARA EL DISEÑO DE MOBILIARIO Y ARQUITECTURA DE INTERIORES”

con una participación de 17 horas en el XXIX Tianguis de la Ciencia

29 y 30 de marzo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán 2019



Dr. Marco Antonio Landavazo Arias

Coordinador de la Investigación Científica



8.2.10. Tianguis de la Ciencia. (2019). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Coordinación de Investigación Científica a través del
Departamento de Comunicación de la Ciencia

otorgan la presente

CONSTANCIA

Israel Macedo Alquicira

por su participación como:

COLABORADOR DEL TALLER

“USOS DE LA MADERA EN EL DISEÑO DE MOBILIARIO URBANO”

con una participación de 17 horas en el XXIX Tianguis de la Ciencia

29 y 30 de marzo, Ciudad Universitaria; Morelia, Michoacán 2019

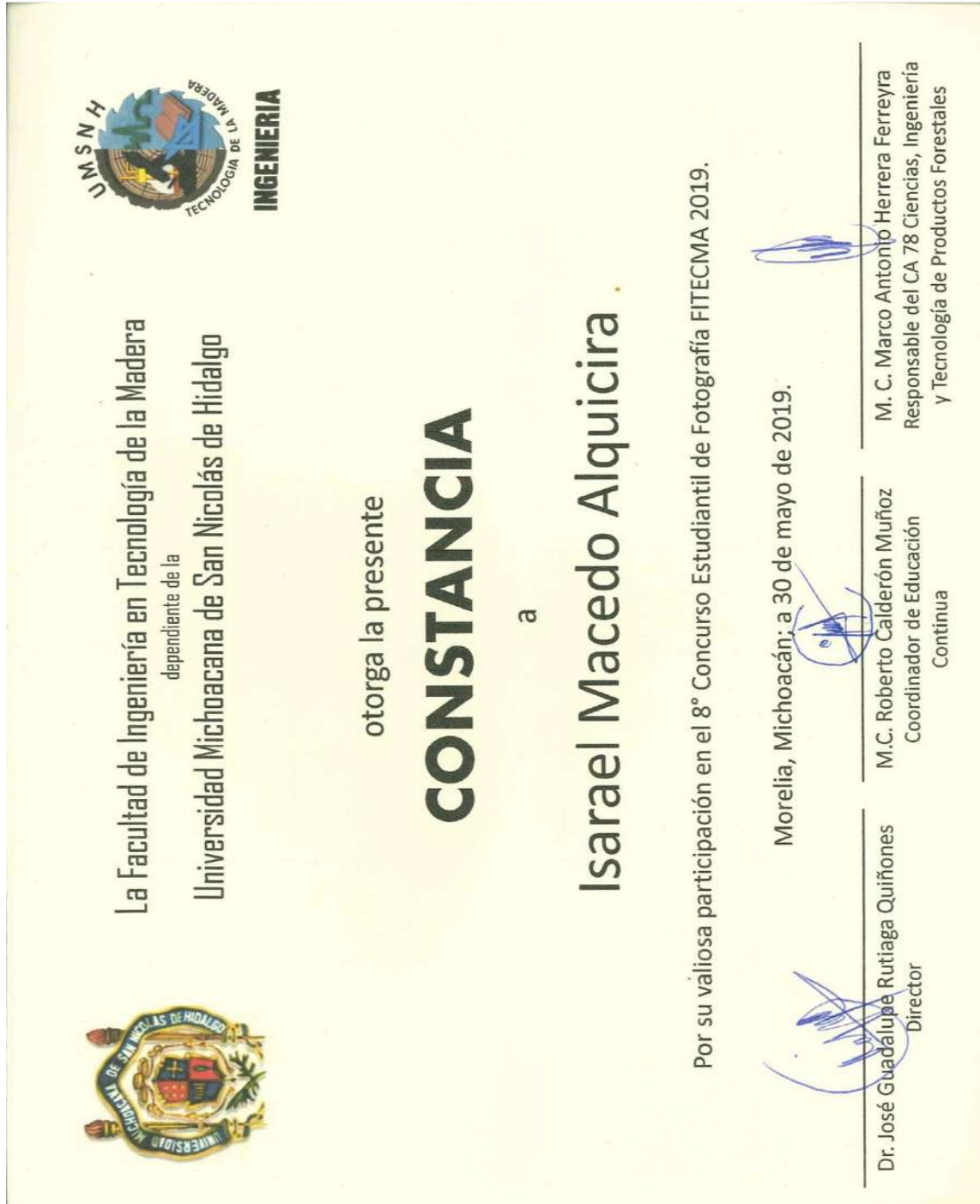


Dr. Marco Antonio Landavazo Arias

Coordinador de la Investigación Científica



8.2.11. 8° Concurso Estudiantil de Fotografía FITECMA. (2019). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Morelia, México.



8.2.12. 8° Concurso Estudiantil de Fotografía FITECMA. (2019). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Morelia, México.





El Gobierno del Estado de Michoacán, a través del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, en colaboración con el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Morelia y el respaldo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, otorgan la presente:

CONSTANCIA

JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS; ISRAEL MACEDO ALQUICIRA; FRANCISCO JAVIER CASTRO SÁNCHEZ

A:

POR LA EXPOSICIÓN DE SU PONENCIA MADERA LAMINADA Y MADERA MULTIMATERIAL-ADHESIVO-MALLA COMO REEMPLAZO DE MADERA MACIZA EN RESTAURACIÓN DE EDIFICIOS HISTÓRICOS. EN EL EJE 1. INVESTIGACIÓN BÁSICA DE LA MESA 2: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

En el marco de las actividades académicas del

15. CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN **y el 9** Encuentro de Jóvenes Investigadores del Estado de Michoacán

Morelia, Michoacán, a 30 de octubre de 2020

Dr. José Luis Montañez Espinosa
Director General del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán

Dr. José Luis Gil Vázquez
Director del Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Morelia

8.2.14. Seminarios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. (2020).
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.



La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería en
Tecnología de la Madera

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

Al

MC ISRAEL MACEDO ALQUICIRA

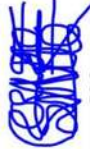
Por su participación como asistente en el marco del ciclo de seminarios del posgrado
correspondiente al semestre 20/21 realizados del 09 de octubre al 18 de diciembre del 2020



Dra. Nancy Elba Rodríguez Olalde
Coordinadora del programa de doctorado
FITECMA-UMSNH



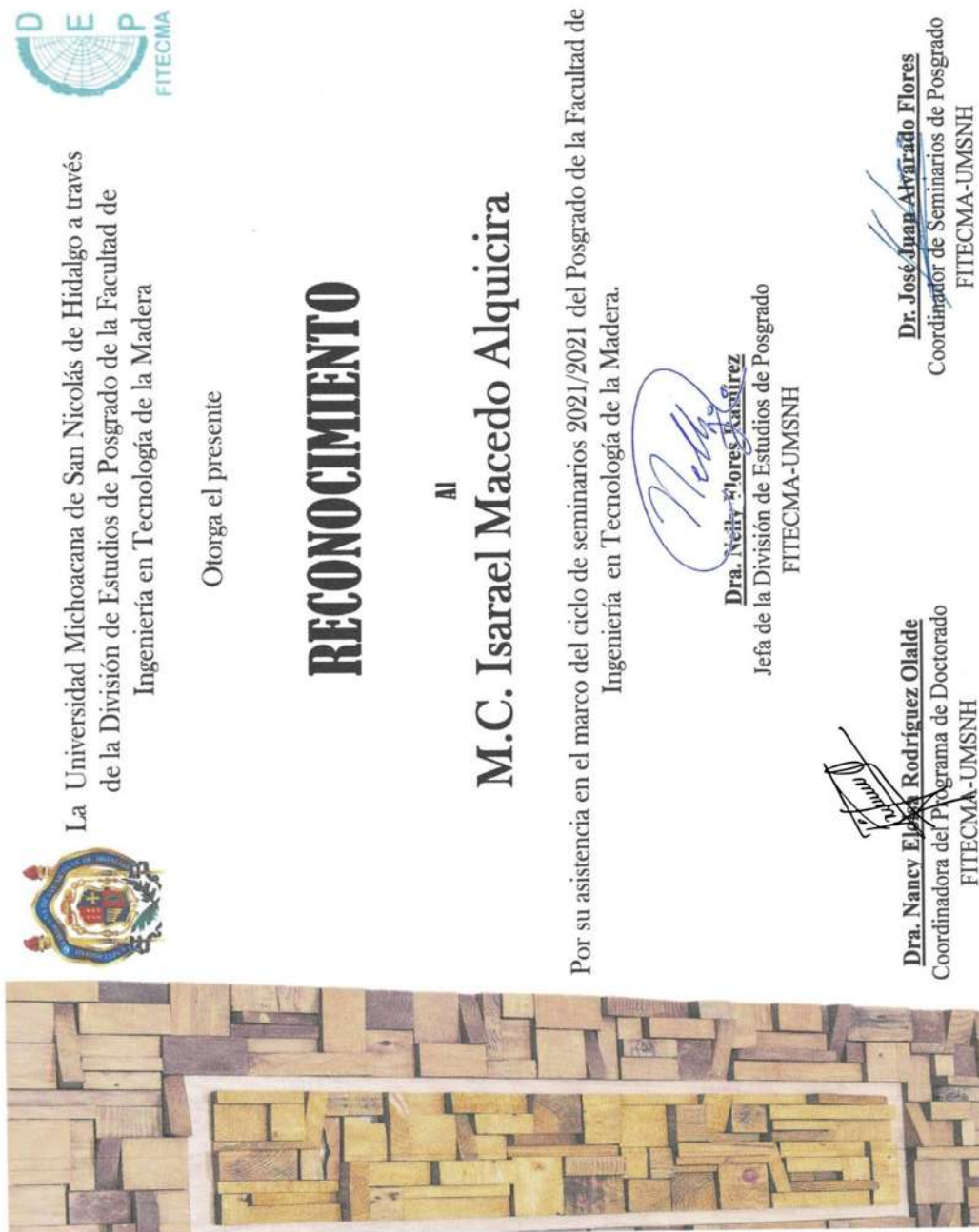
Dra. Nelly Flores Ramírez
Jefa de la División de Estudios de Posgrado
De la FITECMA-UMSNH



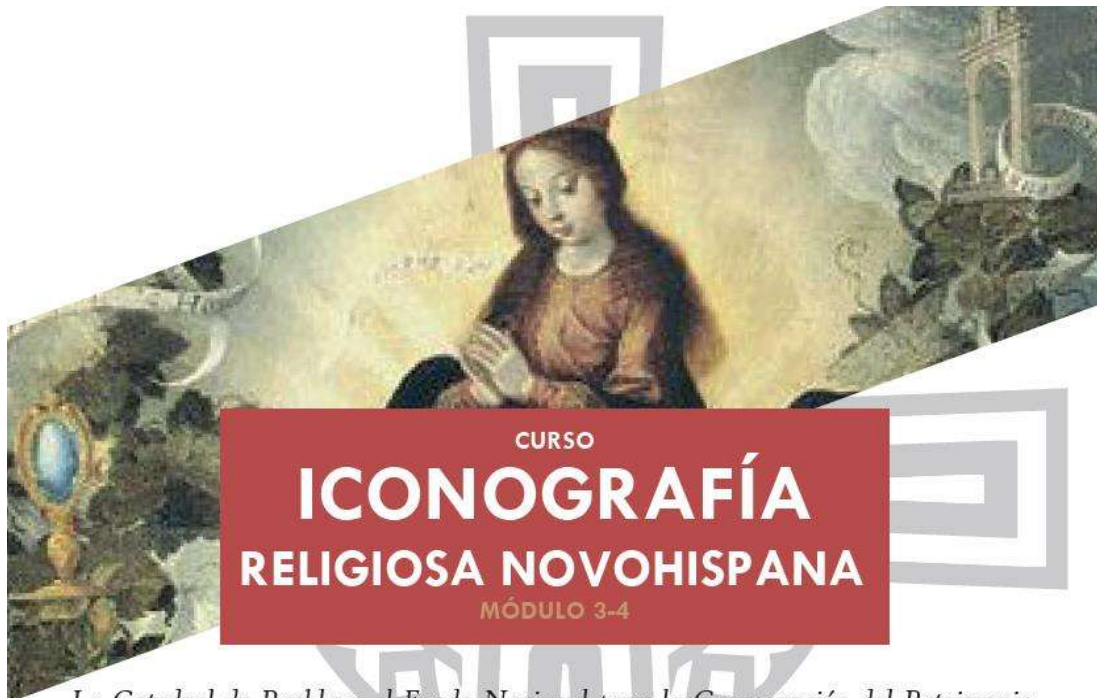
Dr. Crisanto Velázquez Becerra
Coordinador del Programa de Maestría
FITECMA-UMSNH



8.2.15. Seminarios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. (2021).
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.



8.2.16. Curso Iconografía Religiosa Novohispana. (2021). Puebla, México.



*La Catedral de Puebla y el Fondo Nacional para la Conservación del Patrimonio,
expiden la presente*

CONSTANCIA

A: ISRAEL MACEDO ALQUICIRA

*por su participación en el **CURSO DE ICONOGRAFÍA RELIGIOSA NOVOHISPANA**
impartido por la Dra. María del Consuelo Maquivar, avalado con cédula profesional
7771905 llevado a cabo del 13 al 27 de mayo del 2021, con un valor curricular de 10 horas.
(31 créditos FCARM SDPC/RII-04/ACAP/02/06042021/16/31/024)*


MRS. María Teresa Cordero Arce
Dirección de Conservación de la Arquidiócesis de Puebla.


Pbro. Francisco Vázquez Ramírez
Canónigo Rector de la Basílica Catedral de Puebla.



8.2.17. Taller-Guía, Ejecución en Obra de Materiales de Restauración de Monumentos Inmuebles. (2021). Puebla, México.



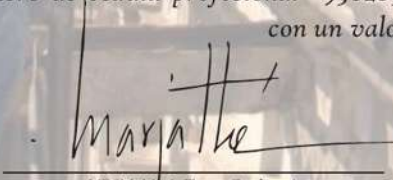
TALLER- GUÍA Ejecución en obra de Materiales de Restauración de Monumentos Inmuebles

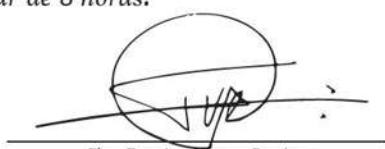
*La Catedral de Puebla y el Fondo Nacional para la Conservación del Patrimonio.
expiden la presente*

CONSTANCIA

A: ISRAEL MACEDO ALQUICIRA

Por su participación en el TALLER-GUÍA, Ejecución en Obra de Materiales de Restauración de Monumentos Inmuebles coordinado por la Mtra. Silvia Yadira Montesinos Zuñiga con número de cédula profesional 9362855, llevado a cabo del 26 de julio al 4 de agosto del 2021, con un valor curricular de 8 horas.


MRS.M. María Teresa Cordero Arce
Dirección de Conservación de la Arquidiócesis de Puebla.


Pbro. Francisco Vázquez Ramírez
Canónigo Rector de la Basílica Catedral de Puebla

8.2.18. Taller-Guía, Internacional, Elaboración de Proyectos de Restauración de Monumentos inmuebles. (2021). Puebla, México.



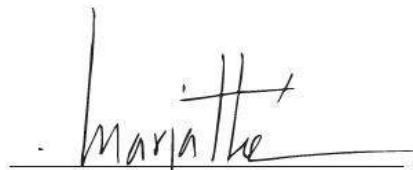
La Catedral de Puebla y el Fondo Nacional para la Conservación del Patrimonio.

expiden la presente

CONSTANCIA

A: ISRAEL MACEDO ALQUICIRA

*Por su participación en el TALLER-GUÍA coordinado por la
Mtra. María Teresa Cordero Arce con número de cédula profesional
8076546 llevado a cabo del 21 de junio al 21 de julio del 2021, con un valor curricular
de 19 horas (34 créditos FCARM SDPC/RII-C-04/AT/01/22022021/34/101).*


MRS. María Teresa Cordero Arce
Dirección de Conservación de la Arquidiócesis de
Puebla.


Pbro. Francisco Vázquez Ramírez
Canónigo Rector de la Basílica Catedral de Puebla



8.2.19. XXVII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica.
(2021). Pachuca, México.



XXVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL
"Diseñando mejores sistemas para el uso sustentable de la energía"

LA SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA, A.C.
OTORGA EL PRESENTE RECONOCIMIENTO

Por su valiosa participación como **PONENTE** a:

Israel Macedo Alquicira

Al presentar el artículo
*A2_9 "Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida,
laminada y multimaterial de Pinus pseudostrobus Lindl."*

durante el XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM celebrado del
22 al 24 de septiembre de 2021 en el Instituto Tecnológico de Pachuca.



Dr. Simón Martínez Martínez
Presidente de la SOMIM



TECNM
TECNOLOGICO NACIONAL DE
MEXICO



HIDALGO
crece contigo





El Gobierno del Estado de Michoacán, a través del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación, en colaboración con el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Morelia y el respaldo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología otorgan la presente:

CONSTANCIA

JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS; ISRAEL MACEDO ALQUICIRA; HUGO LUIS CHAVEZ GARCIA; TOMOYUKI HAYASHI; KOJI ADACHI;

A:

POR LA EXPOSICIÓN DE SU PONENTIA *VARIABILIDAD EN LAS DENSIDADES, LAS VELOCIDADES DEL ULTRASONIDO Y LOS MÓDULOS DINÁMICOS EN TRES MADERAS MEXICANAS Y TRES MADERAS JAPONESAS. EN EL EJE 1. INVESTIGACIÓN BÁSICA DE LA MESA 2: CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*

En el marco de las actividades académicas del



Morelia, Michoacán, a 22 de Octubre de 2021

Biol. María Piedad Trujillo García
Directora General del Instituto de Ciencia
Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán

Dr. José Luis Gil Vázquez
Director del Tecnológico Nacional de México,
campus Instituto Tecnológico de Morelia

8.2.21. Concurso de Calaveras FITECMA. (2021). Morelia, México.



La Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera
dependiente de la
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



otorga la presente

CONSTANCIA

a

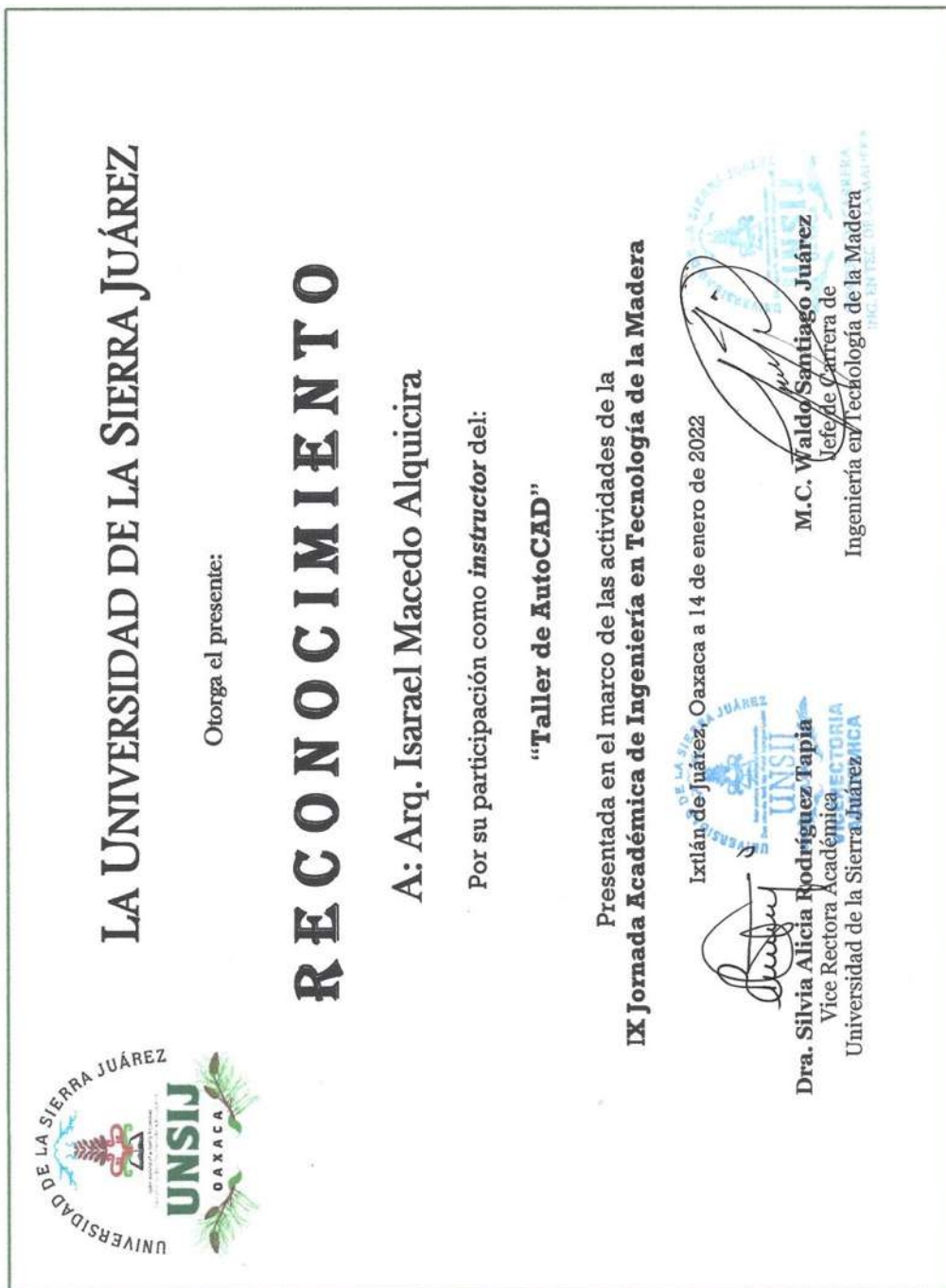
Israel Macedo Alquicira

Por haber obtenido el **Primer lugar** en el 5º Concurso de Calaveras FITECMA 2021.

Morelia, Michoacán; a 11 de noviembre de 2021.

Dr. David Raya González
Director

M. C. Abril Munro Rojas
Coordinadora del Programa de Tutorías





LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA EN TECNOLOGIA DE LA MADERA
dependiente de la

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO



Otorga la presente

CONSTANCIA

a: *M. C. Israel Macedo Alquicira*

Por la exposición de su ponencia:

*Caracterización de la madera sólida, laminada y multimaterial de Pinus
Pseudotsotrobus Lindl.*

Dentro del marco de las actividades académicas de los SEMINARIOS DE POSGRADO del ciclo 21/22

Morelia, Michoacán a 12 de Noviembre del 2021


Dra. Nelly Flores Ramírez

Jefa de la División de Estudios de posgrado



FACULTAD DE INGENIERIA
EN TECNOLOGIA DE LA MADERA



Dr. David Raya González
Director Provisional de la FITECMA.

8.2.24 Seminarios de Posgrado, (2022) Morelia México.

En el marco del **50 ANIVERSARIO** de la
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
DE LA MADERA

LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
OTORGA el presente RECONOCIMIENTO a

M.C. Israel Macedo
Alquicira

Por su participación en la coordinación, del Seminario de Posgrado **LA INVESTIGACIÓN DE LA MADERA: Los retos de un material con potencial para el desarrollo**, que se efectuaron del 31 de marzo al 16 de junio de 2022.

Morelia, Michoacán, a 16 de junio de 2022

Dr. Francisco Javier Castro
Sánchez
Coordinador del Seminario

Dra. Nelly Flores Ramírez
Jefe de la División de Estudios de Posgrado

UNIVERSIDAD
Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo

INGENIERIA

ANIVERSARIO 1972-2022

"La MADERA, como las COSAS MÁS MARAVILLOSAS DE LA VIDA, parece desparecer en silencio..."



DOI: 10.26461/24.07

ARTÍCULOS

Resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*

Electrical resistivity of the wood of *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* and *Quercus scytophylla*

Resistividade elétrica da madeira de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* e *Quercus scytophylla*

JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS ⁽¹⁾

ISRAEL MACEDO ALQUICIRA ⁽¹⁾

ERNESTO MENDOZA GONZÁLEZ ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

RECIBIDO: 1/8/2022 → APROBADO: 14/12/2022 mader999@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la resistividad eléctrica de la madera de *Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla* en las direcciones de anisotropía. Para ello se prepararon 20 probetas de madera sólida de cada una de las especies con dimensiones de 20 mm × 20 mm × 20 mm en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, respectivamente, y se determinó la densidad y el contenido de humedad de la madera. Para realizar las pruebas de resistividad eléctrica se midió la resistencia eléctrica empleando corriente continua con una tensión de prueba de 1000 voltios. El contenido de humedad fue para *P. pseudostrobus* 12,6%, para *T. rosea* 10,6% y para *Q. scytophylla* 15,6%. La resistividad eléctrica transversal promedio fue para *P. pseudostrobus* 45,5 MΩ m, para *T. rosea* 10,3 MΩ m y para *Q. scytophylla* 61,4 MΩ m. La resistividad eléctrica longitudinal fue para *P. pseudostrobus* 24,7 MΩ m, para *T. rosea* 2,2 MΩ m y para *Q. scytophylla* 19,6 MΩ m. Las magnitudes de las resistencias longitudinales medidas en las tres maderas son similares a las de las maderas reportadas en la literatura. Otro hallazgo fue que los valores de las resistividades muestran diferencias entre las direcciones de anisotropía de la madera y entre las especies estudiadas.

Palabras clave: densidad de la madera, humedad de la madera, resistencia eléctrica, corriente continua, anisotropía.



Pruebas de torsión dinámica de madera sólida y de multimaterial de *Fagus crenata*

Dynamic torsion testing of solid wood and multimaterial of *Fagus crenata*

Israael Macedo-Alquicira ¹

Juan Bedolla-Arrollo ¹

David Raya-González ¹

José Rutiaga-Quiriones ¹

Francisco Castro-Sánchez ¹

Javier Sotomayor-Castellanos ^{1*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

*Autor para correspondencia: maderas999@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.54753/blc.v12i2.1486>

Recibido: 26/09/2022

Aceptado: 17/10/2022

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar el módulo de rigidez con pruebas de torsión dinámica en probetas de madera sólida y multimaterial de *Fagus crenata*. Se prepararon 24 probetas de madera sólida para realizarles pruebas de torsión. Hechas las pruebas, con este mismo material se elaboraron 12 probetas de multimaterial formado por dos placas de madera sólida que cubren una malla de acero, unida con un adhesivo de dos compoens de poliuretano. Con estas probetas se realizó una segunda serie de pruebas de torsión. Se realizaron pruebas de normalidad y de verificación y de análisis de varianza. La densidad promedio del multimaterial aumenta 7,2 % en relación con la de la madera sólida. El módulo de rigidez del multimaterial se incrementa 13,7 % en comparación con el de la madera sólida y el coeficiente de variación disminuye 71,1 % en comparación con el de la madera sólida. El multimaterial exhibe una mejora tecnológica por el aumento y por la estabilidad de su rigidez cuando está sometido a deformaciones angulares elásticas. De esta manera, la caracterización mecánica del multimaterial muestra su potencial de innovación en aplicaciones no tradicionales de la madera sólida en la edificación residencial.

Palabras clave: densidad de la madera, módulo de rigidez, mejora tecnológica.

Tema A2a Materiales: Maderas

“Velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos de madera sólida, laminada y multimaterial de *Pinus pseudostrobus* Lindl.”

Israel Macedo Alquicira^a, Javier Ramón Sotomayor Castellanos^b.

^aUniversidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida J. Múgica S/N, CU, Morelia 58030, México.

^bUniversidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida J. Múgica S/N, CU, Morelia 58030, México.

(Deje este espacio en blanco) (Times New Roman 8)

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en probetas de madera sólida, madera laminada y multimaterial elaboradas con *Pinus pseudostrobus*. Se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Se determinaron las densidades, contenidos de humedad, velocidades del ultrasonido y módulos dinámicos. Se calcularon las relaciones de anisotropía y las longitudes de onda. Los parámetros estudiados son diferentes para cada tipo de material y según la dirección de medición. Los resultados permiten caracterizar los tres tipos de material en una escala de probetas de pequeñas dimensiones. El pegamento y la malla modifican las magnitudes de la densidad, velocidad y módulo dinámico de la madera laminada y del multimaterial, respecto a las de la madera sólida.

Palabras Clave: Densidad de la madera, contenido de humedad, anisotropía, longitud de onda.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the ultrasound speeds and the dynamic modules in solid wood, laminated wood and multimaterial specimens made with *Pinus pseudostrobus*. Ultrasound tests were performed in the radial, tangential and longitudinal directions. Densities, moisture content, ultrasound velocities, and dynamic moduli were determined. Anisotropy ratios and wavelengths were calculated. The parameters studied are different for each type of material and according to the direction of measurement. The results allow to characterize the three types of material on a scale of small specimens. Glue and mesh modify the magnitudes of density, speed and dynamic modulus of laminated wood and multimaterial, compared to solid wood.

Keywords: Wood density, moisture content, anisotropy, wavelength.

1. Introducción

La madera es un material biodiverso, estructuralmente heterogéneo y mecánicamente anisotrópico. Estas propiedades son consecuencia de la estructura celular específica de cada especie [1]. Sus características físicas requieren uniformidad para utilizarla correctamente como material de ingeniería, así como en el diseño industrial y arquitectónico. La solución tecnológica a este problema es el desarrollo experimental y la producción industrial de madera laminada y reconstituida que

aseguren los criterios de confiabilidad estructural y de servicio de una estructura de madera [2].

El proceso de manufactura de productos de madera de ingeniería es una estrategia industrial que reduce y minimiza la influencia de defectos de la madera para la aplicación de criterios de diseño en ingeniería. Se puede obtener un material normalizado y con características de resistencia confiables para su uso en ingeniería, si la madera se combina con adhesivos, y si se modifica su configuración material natural en componentes con geometría apropiada al proyecto de diseño arquitectónico y de ingeniería [3].

LAMINATED WOOD AND MULTIMATERIAL WOOD – ADHESIVE MESHES REPLACEMENTS OF SOLID WOOD IN RESTORATION OF HISTORICAL BUILDINGS

I. Macedo Alquicira^{1*}, J. R. Sotomayor Castellanos², F. J. Castro Sánchez³

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México - macedoisrael@gmail.com

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México - maderad999@yahoo.com

³Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México - maderadesarrollo2764@gmail.com

KEY WORDS: humidity contents, density, ultrasound, dynamic module, quality factor, *P. pseudostrobus*

ABSTRACT:

Wooden structure restoration work in historical buildings requires substitution and/or reparation of structural elements. The aim of this investigation is to compare the density, wave velocity, dynamic module, and quality factor in test pieces of solid wood, laminated wood and a multimaterial of *P. pseudostrobus*. The work hypothesis proposes that dynamic modules of laminated wood and multimaterial laminated wood reinforced with stainless steel mesh are, at least, equal to solid wood. Small dimension test pieces made of solid wood, laminated wood, and multimaterial wood elaborated with the species *P. pseudostrobus* were prepared. Humidity content and apparent density of wood were determined. Ultrasound tests in radial, tangential, and longitudinal direction were done and wave velocity, dynamic module, and quality factor were determined. Empirical evidence indicates that wave velocity, dynamic module, and quality factors are different with the three kinds of test pieces. Laminated wood and multimaterial wood characteristics are similar to *P. pseudostrobus* solid wood; so that the two compound material have good expectations to substitute some pieces that work as resistance elements in wooden structures.

1. INTRODUCTION

1.1 Problem

Wooden structure restoration work in buildings with historical and cultural value requires the reparation and/or, eventually, the substitution of structural elements such as beams, columns, girders and the components of roof truss, walls, floors and stairways. (Van Roy et al., 2018) In order to respect the wooden historical structures preservation principles of the International Council on Monuments and Sites (ICOMOS, 1999), it is necessary to substitute some pieces of wood which are deteriorated by new elements of the same species and with technological quality equivalent to the wood in service (Cruz et al., 2015).

The person in charge of the restoration faces the problem of scarcity of wood pieces comparable in dimensions and similar to the structural elements in service. A practical solution to this problem is to elaborate reinforced and/or reconstructed laminated wood pieces that satisfy the mechanical resistance criteria, in such a way that reliable structural criteria and the renovated structural service can be assured (Croatto y Turrini, 2014; Larsen y Marstein, 2016).

1.2 Reinforced Wood

Some elements made of wood, such as recycled beams used to support flexion charges, have been submitted for replacement or reinforcement with classical techniques which involve the use of common construction materials such as concrete or steel (Borriet

al, 2005). However, literature reports new approaches and new technology in order to repair, restore and reinforce some pieces of wood present in buildings where wood plays an important role.

Recent research about the topic, reinforcement and reparation of structural wood elements, preferably studies beams of solid and laminated wood, that potentially or in-service structures exist for future edifications. For example, Jasiénko y Nowak (2014) reinforced beams with new and old wood with the purpose of evaluating different configurations of epoxy adhesive and flexion tested steel plaques; likewise, Frank et al. (2015) reported different reinforcement techniques for beams depending on the kind or origin of the failure.

A favored strategy to reinforce pieces of wood is the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Schober et al (2015) recommend CFRP to repair and reinforce wood structures. In order to improve mechanical resistance in pieces of wood, Corradi et al (2015) add CFRP to pieces of solid wood of Castañee Sativa, while Nadir et al. (2016) did it with laminated wood of Hevea Brasiliensis. Reis et al (2018) recommend CFRP soaked bars to reinforce wood beams.

Particularly, working in historical buildings, Nowak et al (2013) added CFRP to reinforce *Pinus Sylvestris* beams in order to restore charge capacity in wooden beams. Chang (2015) reviews different techniques to reinforce and to repair wooden columns and walls, while Gubana (2015) did the same on wooden floors. Rescalvo et al (2017) and Rescalvo et al (2018) use different configurations of CFRP to reinforce *Pinus Sylvestris* old wood, and to analyze the increment in mechanical resistance.

* I. Macedo Alquicira



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas*

Variability in Densities, Ultrasound Speeds and Dynamic Modulus in Three Mexican and Three Japanese Woods

JAVIER RAMÓN SOTOMAYOR CASTELLANOS**
ISRAEL MACEDO ALQUICIRA***
HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA****

* La investigación estuvo patrocinada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), México. El material experimental de maderas japonesas fue donado por Tomoyuki Hayashi y Koji Adachi, ambos profesores de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón, y por Ryuichi Iida, profesor de la Universidad Politécnica de Tokio, Japón. Las pruebas de ultrasonido se realizaron en el Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH. Ernesto Mendoza González, alumno de la Maestría de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la UMSNH colaboró en los trabajos de laboratorio.

** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>
Correspondencia: madera999@yahoo.com

*** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6432-6574>

**** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6114-4900>



INGENIERÍA Y
DESARROLLO

Vol. 38 n.º 2, 2020
2145-9371 (on line)
Universidad del Norte



Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de **madera sólida y laminada** de *Pinus pseudostrobus*

Density, ultrasound speed and dynamic modulus of solid and laminated wood of *Pinus pseudostrobus*

Israel Macedo Alquicira¹ y Javier Ramón Sotomayor Castellanos^{*}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

^{*} Autor de correspondencia. madera999@yahoo.com

RESUMEN

La madera laminada potencialmente puede sustituir a la madera sólida para elaborar un material de ingeniería menos variable y más homogéneo. Existe poca información que compare simultáneamente, y en una misma especie, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en madera sólida *versus* laminada. El objetivo de la investigación fue verificar experimentalmente, en probetas de pequeñas dimensiones, si las características de la madera laminada de *Pinus pseudostrobus* son similares a las de la madera sólida. Para ello, se calcularon sus densidades y se realizaron pruebas de ultrasonido en las direcciones radial, tangencial y longitudinal. También, se determinaron las velocidades y los módulos dinámicos. Los resultados indican que la densidad de la madera laminada aumenta en comparación con la de la madera sólida. Las velocidades y los módulos dinámicos disminuyen en las direcciones radial y tangencial; en cambio, aumentan para la dirección longitudinal. Se verificó experimentalmente que las magnitudes de la densidad, la velocidad y el módulo dinámico en madera laminada son similares a las de madera sólida de esta especie. La variabilidad en las características estudiadas disminuye como efecto de reconstituir madera sólida. Para las velocidades y los módulos dinámicos de la madera sólida, sus relaciones de anisotropía muestran proporciones similares a las encontradas en la literatura, pero las magnitudes son particulares a cada especie. La investigación aporta datos de referencia e informa que la madera sólida y laminada, de *P. pseudostrobus* puede ser caracterizada con un método no destructivo.

PALABRAS CLAVE: anisotropía de la madera; caracterización mecánica; contenido de humedad; pruebas no destructivas; variabilidad de la madera.

ABSTRACT

Laminated wood can potentially replace solid wood to make a less variable and more homogeneous engineered material. There is little information that compares, simultaneously and in the same species, the ultrasound speeds and the dynamic modules in solid versus laminated wood. The objective of the investigation was to verify experimentally, in small specimens, if the characteristics of *Pinus pseudostrobus* laminated wood are similar to those of solid wood. For this, their densities were calculated and ultrasound tests were performed in the radial, tangential and longitudinal directions. Also, the speeds and dynamic modules were determined. The results indicate that the density of laminated wood increases, compared to that of solid wood. Speeds and dynamic moduli decrease in radial and tangential directions; instead, they increase for the longitudinal direction. It was experimentally verified that the magnitudes of density, velocity and dynamic modulus in laminated wood are similar to those of solid wood of this species. The variability in the studied characteristics decreases as an effect of reconstituting solid wood. For the speeds and dynamic modules of solid wood, their anisotropy ratios show proportions similar to those reported in the literature, but the magnitudes are specific to each species. The research provides reference data and informs that the solid and laminated wood of *P. pseudostrobus* can be characterized with a non-destructive method.

KEYWORDS: anisotropy of wood; mechanical characterization; moisture content; non-destructive testing; wood variability.

Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos, Israel Macedo-Alquicira,
Ernesto Mendoza-González

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
madera999@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad básica, el contenido de humedad inicial, el máximo contenido de humedad, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia domell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia*. La variabilidad de las características higroscópicas de las maderas estudiadas puede explicarse por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie. Sin embargo, sus correlaciones estadísticas, así como sus magnitudes se sitúan en los rangos reportados en la bibliografía.

PALABRAS CLAVE

Variabilidad, hidratado de la madera, secado de la madera, correlaciones estadísticas.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the basic density, the initial moisture content, the maximum moisture content, the fiber saturation point, the cell wall percentage and the void space percentage of eight Mexican woods: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia domell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* and *Guazuma ulmifolia*. The variability of the hygroscopic characteristics of the woods studied can be explained by the differences in the anatomical characteristics of each species. However, their magnitudes are within the ranges reported in the bibliography.

KEYWORDS

Variability, wood hydration, wood drying, statistical correlations.

INTRODUCCIÓN

La demanda de materiales sostenibles y procesos responsables con el ambiente en la industria de la construcción ha generado un renovado interés en la investigación de las propiedades esenciales de la madera y sus aplicaciones derivadas, específicamente, para el desarrollo de sistemas de adaptación arquitectónicos de baja tecnología. La capacidad de diseñar compuestos de madera cuyo estado de tensión permanezca limitado bajo los cambios de la humedad ambiental es beneficiosa para cualquier aplicación de ingeniería, sometida a una variación repetida de la carga, como son los sistemas adaptativos.¹

Artículo de Investigación

Higroexpansión, higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas

Hygroexpansion, hygrocontraction and their anisotropy relationships of eight mexican wood

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos^{1*}, Israel Macedo-Alquicira¹ y Ernesto Mendoza-González¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México.

*Correspondencia: madera999@yahoo.com (Javier Ramón Sotomayor Castellanos)

DOI:

Recibido: 09 de octubre de 2021; Aceptado: 15 de diciembre de 2021

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar los coeficientes de higroexpansión, de higrocontracción y sus relaciones de anisotropía de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia*. Se realizaron pruebas de higroscopía con un procedimiento de humidificación y secado de probetas de pequeñas dimensiones. Las magnitudes de las higroexpansiones e higrocontracciones son similares a las de otras especies mexicanas reportadas en la literatura. Los coeficientes denotan un carácter anisotrópico en las direcciones radial y tangencial. La densidad de la madera es un buen predictor de los coeficientes. Sin embargo, las correlaciones de las relaciones de anisotropía son diferentes a las reportadas en trabajos anteriores.

Palabras clave: coeficiente de higroexpansión, coeficiente de higrocontracción, pruebas de higroscopía, correlaciones estadísticas.

Abstract

The objective of the research was to determine the coefficients of hygroexpansion, hygrocontraction and their anisotropy relationships of eight Mexican woods: *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* and *Guazuma ulmifolia*. Hygroscopic tests were carried out with a humidification and drying procedure of small specimens. The magnitudes of hygroexpansions and hygrocontractions are similar to those of other Mexican species reported in the literature. The coefficients denote anisotropic character in the radial and tangential directions. The density of the wood is a good predictor of the coefficients. However, the correlations of the anisotropy relations are different from those reported in previous works.



DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO
ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA

Certificado de acuse
de recibo registro:
MX/2021/071008

Expediente de Patente MX/a/2021/008164

Asunto: Se informa resultado del examen de forma.

Ciudad de México, a 6 de octubre de 2021.

No. Folio: 92330

Nancy Yunuen CORTES RAYA
Apoderado de
Israel MACEDO ALQUICIRA
Javier Ramon SOTOMAYOR CASTELLANOS
YUCATAN 143
MOLINO DE PARRAS
58010, MORELIA, Michoacán, México

REF: Se da acuse de recibo a su escrito.

En términos de lo dispuesto por el artículo 106 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y artículos 18, 19 y 26 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; se tiene por satisfecho el examen de forma al haber cumplido con lo dispuesto por la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y el Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial en términos de lo dispuesto por el artículo Cuarto Transitorio del DECRETO por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y se abroga la Ley de la Propiedad Industrial publicado en el Diario Oficial de la Federación del día 01 de julio de 2020.

Por lo anterior, de conformidad con los artículos 107 y 108 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; artículos 39 y 40 del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial y artículo 9 del Acuerdo por el que se establecen los plazos de respuesta a diversos trámites ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, una vez aprobado el examen de forma, la publicación en Gaceta de la presente solicitud de patente en trámite, tendrá lugar después del vencimiento del plazo de 18 meses, contado a partir de la fecha de presentación de la solicitud de patente, o en su caso, de prioridad reconocida, la cual contendrá los datos bibliográficos comprendidos en la solicitud presentada, el resumen de la invención y, en su caso, el dibujo más ilustrativo de la misma o la fórmula química que mejor la caracterice.

No obstante, el penúltimo párrafo del artículo 107 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; artículo 40 del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial y 10 del Acuerdo por el que se establecen los plazos de respuesta a diversos trámites ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, prevén que a petición del solicitante mediante escrito, la solicitud de patente podrá ser



MX/2021/92330

Arenal No. 550, Pueblo Santa María Tepepan, Ciudad de México, C.P. 16020. CDMX

www.gob.mx/imp



