



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

División de Estudios de Posgrado

Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera

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

Evaluación Ultrasónica de Madera Estructural de Reciente Corta y de Recuperación en Edificios Históricos como Método para el Reciclaje y Sustitución de Elementos del Patrimonio Construido.

Presenta:

M.C. Mayra Irery Carrillo Gómez

Director de Tesis:

Dr. David Raya González

Co-Director de Tesis:

Dr. Carlos Alberto Hiriart Pardo

Sinodales

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Dr. Francisco Javier Castro Sánchez

Dr. Juan Zárate Medina

Morelia, Michoacán, 2022

Dedicatoria

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.
Mis padres Luis Carrillo Ortiz y María del Carmen Gómez Nava

A mis hermanos que siempre me han brindado su apoyo en todos los momentos de mi vida, aconsejándome y brindándome su amor Luis y Daniel Carrillo Gómez.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Gracias por estar siempre presentes.

“A la manera que el río hace sus propias riberas, así toda idea legítima hace sus propios caminos y conductos”.

Ralfh W. Emerson

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y a sus diversas facultades e institutos que me permitieron el acceso al conocimiento necesario para la obtención de mi grado de académico.

A Conacyt, por su apoyo económico como parte del programa de becas nacionales de excelencia.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera en la División de Estudios de Posgrado, por permitirme cursar mi Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera.

A la Facultad de Arquitectura en la División de Estudios de Posgrado, por todo su apoyo en esta etapa de mi formación.

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas por las facilidades brindadas para la realización de mi trabajo de investigación, de manera especial al Dr. Héctor Guillermo Carreón Garcidueñas, quien me brindó su apoyo a lo largo de todo este proceso sacando lo mejor de mí en cada etapa de esta investigación.

Al Instituto Nacional de Antropología e Historia a través del Centro INAH Michoacán, por las facilidades y el apoyo brindado al momento de efectuar mi investigación de campo en los edificios bajo su resguardo.

A las autoridades de la Catedral Metropolitana de Morelia, de manera especial al Presbítero Humberto González Correa Custodio del Edificio de la Santa Mitra de la Catedral Metropolitana de Morelia, y a la Comisión de Arte Sacro de la Arquidiócesis de Morelia, por las facilidades y recomendaciones para esta investigación.

Al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil, por las facilidades brindadas.

A mi Director de Tesis el Dr. David Raya Gonzales, quien me apoyo a lo largo de toda mi investigación fortaleciendo mis conocimientos en las ciencias y tecnologías de la madera.

A mi Co-Director de Tesis el Dr. Carlos Alberto Hiriart Pardo, quien me brindo su apoyo en mi proceso de investigación y formación desde el punto de vista de la conservación del Patrimonio Histórico.

A mi mesa sinodal al Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, al Dr. Francisco Javier Castro Sánchez y al Dr. Juan Zárate Medina, ya que gracias a sus aportaciones se enriqueció mi trabajo de investigación permitiéndome ampliar mis conocimientos científicos en las distintas áreas de sus respectivas especializaciones.

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme y a todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Índice	III
Índice de Tablas	VIII
Índice de Figuras	IX
Índice de Ecuaciones	XXI
Índice de Anexos	XXI
Resumen	XXIII
Abstract	XXIV
1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	8
3.1 Contribución del proyecto	12
4. Hipótesis	16
5. Objetivos Generales	16
5.1 Objetivos particulares	17
5.1.1 Objetivos para análisis químico	17
6. Marco teórico conceptual	18
6.1. La Madera de pinos	19
6.2. Propiedades Físicas de la Madera	20
6.2.1. Material Anisotrópico, Ortotrópico	20
6.2.2. Higroscopicidad y Contenido de Humedad	21
6.2.3. Densidad y Dureza	21
6.2.4. Propiedades Acústicas y Transmisión del sonido	22
6.3. Definición de Planos o Secciones	22
6.4. Características Anatómicas de la madera	23
6.4.1. Estructura Macroscópica	24
6.4.2. Estructura Submicroscópica	25
6.4.3. Estructura Microscópica	26
6.5. Los Defectos Naturales en la Madera Aserrada	26
6.5.3. Nudos	27
6.6. La Madera Actual y la Madera de Recuperación	28
6.7. Degradación de la madera	29
6.7.1. Patologías de la madera.	29
6.8. Tratamientos preventivos y curativos para eliminar las plagas de la madera	32
6.9. Propiedades y Clasificación mecánica automática de la Madera	32
6.10. Módulo de Young o Módulo de elasticidad longitudinal	33
6.10.1. Resistencia a la flexión	37
6.10.2. Resistencia a la compresión	38
6.10.3. Módulo de Corte	39
6.10.4. Resistencia a la tracción	40
6.11. Vigas y zonas críticas	41
6.12. Los ensayos sobre la madera	42
6.12.1. Inspección visual y organoléptica	43
6.12.2. Ensayos de humedad y densidad	43
6.12.3. Ensayos de laboratorio	43
6.12.4. Ensayos sobre probetas de pequeño tamaño	43

6.12.5. Ensayos sobre probetas de tamaño real	44
6.12.6. Ensayos realizados en el lugar, clasificación visual y técnicas no destructivas	44
6.12.7. Ensayos de ultrasonidos	45
6.13. La influencia de las Propiedades Químicas de la Madera y su Deterioro	47
6.14. Ultrasonido	53
6.14.1. Ondas Ultrasónicas	53
6.15. Tipos de ondas en sólidos y fluidos	54
6.16. Velocidad ultrasónica	55
6.17. Atenuación ultrasónica	56
6.17.1. La Atenuación Ultrasónica y Microestructura	58
6.18. Birrefringencia	59
6.18.1. Medición de la Birrefringencia	60
6.19. Microscopia Electrónica de Barrido	60
7. Antecedentes	62
7.1. La utilización de Técnicas de Ultrasonido en la conservación de las estructuras históricas.	62
7.2. Utilización de Técnicas de Ultrasonido en la madera	63
7.3. La noción actual de Patrimonio Monumental	65
7.4. Panorama actual del empleo de la madera en las edificaciones	68
7.5. Situación actual de la Rehabilitación de la Madera en los Monumentos	70
7.5.1. La inspección y diagnóstico de estructuras de madera	73
7.6. Tipos de inspección de las estructuras de madera (Técnicas portátiles y Técnicas fijas)	73
7.6.1. Planteamiento general de la clasificación visual	73
7.6.2. La inspección y diagnóstico de estructuras de madera	74
7.6.3. Condicionantes y recomendaciones de la restauración y la rehabilitación en estructuras de madera	75
7.5.4. Términos como rehabilitación, reparación y restauración.	77
7.6.5. El proceso de inspección de las estructuras de madera de una edificación en un centro urbano (en España)	78
7.7. La calidad de la madera de recuperación y su clasificación en las intervenciones arquitectónicas	79
8. Métodos y técnicas ultrasónicas de inspección y de medición	81
8.1. Técnicas Ultrasónicas de Inspección	82
8.1.1. Técnica Ultrasónica de contacto	83
8.1.2. Método Eco Pulso	83
8.1.3. Método de transmisión	84
8.1.4. Método de resonancia	84
8.1.5. Análisis de vibraciones	85
8.2. Tipos de equipos de inspección empleados en las estructuras de madera (Técnicas portátiles y Técnicas fijas)	85
8.2.1. Fakopp Microsecond Timer	85
8.2.2. Equipo de Ultrasonido para la técnica de contacto.	85
9. Material y metodología	88
9.1. Esquemas de estrategias de actuación para inspecciones de edificaciones con estructuras de madera	89
9.1.1. Descripción general de los casos de estudio y la metodología general	92

10. Caso 1	100
10.1. Antecedentes	100
10.2. Inspección y Metodología	102
10.2.1. Patología de origen biológico	103
10.3. Peritaje estructural	105
10.4. Material	105
10.5. Contenido de humedad y densidad	106
10.6. Pruebas de ondas de esfuerzo	106
10.7. Resultados y Discusión para el Caso 1	107
10.8. Conclusiones Caso 1	110
11. Caso 2	112
11.1. Antecedentes	112
11.2. Inspección	114
11.3. Material analizado <i>in situ</i>	116
11.4. Material empleado para el análisis de Ondas Ultrasónicas y Análisis del Contenido de humedad para ambos grupos de madera <i>in situ</i>	117
11.5. Material empleado para el Análisis Ultrasónico en laboratorio y para las mediciones de birrefringencia para el Caso 2	119
11.5.1. Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad de las probetas para análisis de Ultrasonido	120
11.6. Material empleado para el análisis anatómico microscópico de la madera del Caso 2	120
11.7. Material empleado para la caracterización química	121
11.8. Metodología para las mediciones <i>in situ</i> por medio de Ondas de Esfuerzo	122
11.9. Metodología del empleo de Ondas Ultrasónicas en laboratorio	123
11.10. Determinación de la Anisotropía Acústica para el Caso 2 para la Madera Sana y la Madera de Recuperación Deteriorada	125
11.11. Preparación de muestras para microscopio Electrónico de Barrido	127
11.12. Metodología para análisis químico	128
11.12.1. Determinación del Contenido de Humedad para las muestras empleadas en el Análisis Químico	129
11.12.2. Determinación del contenido de cenizas	129
11.12.3. Medición del pH para las muestras empleadas en el análisis químico del Caso 2	130
11.12.4. Solubilidad en sosa para las muestras empleadas en el análisis químico	130
11.12.5. Obtención de extraíbles para las muestras empleadas en el análisis químico	131
11.12.6. Determinación de holocelulosa para las muestras empleadas en el análisis químico	133
11.12.7. Determinación del contenido de lignina para las muestras empleadas en el análisis químico.	134
11.13. Diseño Experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición L_L y T_R , para el Caso 2	134
11.14. Diseño experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas Ultrasónica en los sentidos de medición L_L , R_R y T_T	135
11.15. Diseño experimental para la Velocidad Transversal con Ondas Ultrasónica en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , para el Caso 2	135

11.16. Diseño Experimental para el Análisis Químico de las vigas 1, 2, 4 y 5 de Madera de Recuperación	136
11.17. Resultados de las mediciones del Contenido de Humedad para los dos grupos de madera en el Caso 2 <i>in situ</i>	137
11.18. Resultados de la Densidad para ambos grupos de madera <i>in situ</i>	138
11.19. Resultados de las mediciones con Ondas de Esfuerzo y Ondas ultrasónicas (Onda Longitudinal y Onda Transversal) para los dos grupos de madera en el Caso 2	139
11.19.1. Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R	140
11.19.2. Módulo de Young de la Velocidad Longitudinal (Ondas de Esfuerzo) para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R	142
11.19.3. Resultados y análisis para las mediciones efectuadas con la Velocidad Longitudinal, por medio de Ultrasonido (laboratorio) para las muestras de Madera Sana y Deteriorada empleando Ultrasonido en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R	144
11.19.4. Módulo de Young con de la Velocidad Longitudinal para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R para el Caso 2	146
11.19.5. Atenuación con de la Velocidad Longitudinal para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R	149
11.19.6. Velocidad Transversal por medio de Ultrasonido para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T	152
11.19.7. Módulo de Corte con de la Velocidad Transversal para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_R , L_T , T_L , T_R , R_L y R_T	156
11.19.8. Atenuación con de la Velocidad Transversal para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T	160
11.20. Resultados y discusión del Análisis estadístico de los datos obtenidos <i>in situ</i> y en laboratorio para las pruebas de Ondas de Esfuerzo y Ultrasonido para el Caso 2	164
11.20.1 Velocidad calculada por medio de Ondas de Esfuerzo y Ultrasonido con la técnica de emisión transmisión	165
11.20.2. Módulo Young	167
11.21. Resultados de las mediciones de birrefringencia para el Caso 2	170
11.22. Análisis anatómico del Caso 2	174
11.22.1. Análisis anatómico Corte Transversal Caso 2	174
11.22.2. Análisis anatómico Corte Radial Caso 2	176
11.22.3. Análisis anatómico Corte Tangencial Caso 2	177
11.23. Resultados y Análisis para las mediciones del Contenido de Sustancias Inorgánicas (Porcentaje de Cenizas) para albura y duramen (sano y deteriorado)	179
11.23.1 Primeros Análisis de la determinación del Contenido de Humedad para el Caso 2 para análisis químico	182

11.23.2. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de pH para albura y duramen (sano y deteriorado)	183
11.23.3. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Solubilidad a la sosa (extraíbles solubles en sosa) para albura y duramen para el Caso 2(sano y deteriorado)	184
11.23.4. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Ciclohexano para albura y duramen (sano y deteriorado)	185
11.23.5. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Acetona para albura y duramen (sano y deteriorado)	186
11.23.6. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Metanol para albura y duramen para el Caso 2 (sano y deteriorado)	186
11.23.7. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Agua caliente para albura y duramen (sano y deteriorado)	187
11.23.8. Resultados y análisis para las Sustancias extraíbles	188
11.23.9. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Holocelulosa para albura y duramen (sano y deteriorado)	190
11.23.10. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Lignina Runkel para albura y duramen (sano y deteriorado)	191
11.23.11. Resumen de los valores de las mediciones de los porcentajes de Ceniza, de extraíbles empleando Equipo Soxhlet, extraíbles solubles en Sosa caustica, de Lignina Runkel y Holocelulosa	192
11.24. Conclusiones de los resultados para las pruebas de los Ensayos no Destructivos para el Caso 2	194
11.24.1. Conclusiones Caso 2 Anisotropía	196
11.24.2. Conclusiones Análisis Químico para el Caso 2	196
12. Caso 3	198
12.1 Antecedentes	198
12.2. Inspección	200
12.2.1 Patología de origen biológico	200
12.3. Peritaje estructural	200
12.4. Material medido <i>in situ</i> empleando Ondas de Esfuerzo	201
12.5. Material para pruebas destructivas Caso 3	205
12.6. Metodología de medición <i>in situ</i>	208
12.7. Metodología de medición de la Densidad y Contenido de Humedad.	210
12.8. Normativa ASTM para ensayos sobre propiedades mecánicas de la madera	211
12.8.1. Determinación del tipo y número de ensayos	211
12.8.2. Fabricación de probetas con base a ASTM D 143	211
12.9. Ensayo de flexión estática	212
12.10. Ensayo de compresión paralelo a la fibra	214
12.11. Presentación de resultados de propiedades mecánicas de la madera resultados y análisis estadístico y procesamiento de datos	216
12.12. Diseño experimental para el análisis de las vigas (deterioradas) para el método de ondas de esfuerzo y para las pruebas físico-mecánicas	216

12.13. Resultados y análisis para las mediciones del contenido de humedad (material sano y deteriorado)	217
12.14. Resultados y análisis para las mediciones de la Velocidad de Onda para las vigas de material sano y deteriorado	219
12.15. Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las vigas de madera de recuperación	220
12.16. Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las zonas de las cabezas de las vigas de madera de recuperación deteriorada	222
12.17. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas del material proveniente de las cabezas de las vigas deteriorado	223
12.18. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para el Módulo de Corte del Caso 3	225
12.19. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para el Módulo de ruptura para el Caso 3	226
12.20. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para Compresión Paralela a la fibra	227
12.21. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas Compresión Perpendicular a la fibra	228
12.22. Resultados y análisis de los promedios generales de los ensayos Físico-mecánicos y de Ondas de Esfuerzo para la madera de la zona de las cabezas de las vigas	230
12.23. Conclusiones para el Caso 3	236
12.23.1. Conclusiones y análisis de resultados para el Contenido de humedad para el Caso 3	237
12.23.2. Conclusiones y análisis del Número de anillos.	237
12.23.3. Conclusiones y análisis de la Densidad	237
12.23.4. Conclusiones y análisis de resultados de Ensayo no destructivo mediante ondas de esfuerzo	237
12.23.5. Conclusiones y análisis de los Ensayos (destructivos) físico-mecánicos	238
13. Conclusiones Generales	244
14. Referencias	244
15 Normas y estándares	265
16 Glosario	265
17. Anexo	272

Índice de Tablas

Tabla 6.1. Comparación de eficacia estructural en relación al peso (Argüelles et al., 2000).	34
Tabla 6.2. Propiedades Mecánicas de algunas especies de madera, (Maderas, 2014).	35
Tabla 6.3. Valores promedio de la resistencia de las Propiedades mecánicas de algunas maderas, (Herrero, 2003).	36
Tabla 6.4. Propiedades Mecánicas de algunas especies de madera de coníferas en kg/cm ² , (Argüelles et al., 2000).	36
Tabla 6.5. Unidades, Simbología y Constantes Elásticas de las Ondas Ultrasónicas	55

Tabla 11.6. Diseño Experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición L_L y T_R , para el Caso 2.	135
Tabla 11.7. Diseño experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas Ultrasonica en los sentidos de medición L_L , R_R y T_T .	135
Tabla 11.8. Diseño experimental para la Velocidad Transversal con Ondas Ultrasonica en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , para el Caso2.	136
Tabla 11.9. Diseño Experimental para el Análisis Químico de las vigas 1, 2, 4 y 5 de Madera de Recuperación.	136
Tabla 11.10. Sustancias inorgánicas (en porcentaje) en albura y duramen de las vigas 1, 2 y 3.	181
Tabla 12.11. Dimensiones de los elementos de madera de reciente corta y madera de recuperación.	205
Tabla 12.12. Diseño Experimental para las pruebas con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición L_L y T_R , para las pruebas fisico-mecánicas.	217

Índice de figuras

Figura 6.1. Ejemplos de las características de las coníferas, (a) conífera, (b) rama con hojas en forma de aguja y cono, (c) plántulas. (Biodiversidad, 2017).	19
Figura 6.2. Dirección o eje longitudinal (1), eje radial (2) y eje tangencial (3), (Javiersv, 2013).	23
Figura 6.3. Estructura microscópica de coníferas. (madera, 2011).	23
Figura 6.4. Secciones o planos de la madera (Maderas, 2014).	24
Figura 6.5. Anillos de crecimiento (forestales, 2010).	25
Figura 6.6. Capas que conforman las paredes celulares en la madera (Agriculture, 2010).	25
Figura 6.7. Diagrama de Esfuerzo-de formación Deformación (e/Lo), Fuerza de Tensión pendiente = E, ultima fuerza de tensión fractura, Esfuerzo (F/A), (1 a 2) Región Elástica, (2 a 3) Región Plástica, (5) Ruptura ultima, (1 a 2) Región Elástica pendiente = Módulo de Young, (2 a 3) Región Plástica (3 a 4) Deformación permanente, (5) Esfuerzo máximo (Tumero, 2010).	33
Figura 6.8. Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos atracción y compresión (a), esquema de las fibras de la madera en sus ejes principales (b), (Giuliano, 2009).	37
Figura 6.9. Relación tensión – deformación de una conífera libre de defectos a flexión (a) y diagrama de resistencia a la flexión en madera (b). (Salas, 2013), (Giuliano, 2009).	38
Figura.6.10. Relación tensión-deformación a compresión perpendicular (a), esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras, (b y c) esquema de ensayo de compresión normal a las fibras. (Salas, 2013; Giuliano, 2009).	38
Figura 6.11. Cubo sometido a una fuerza cortante (a) diagrama del esfuerzo cortante (b), (Ambrose, 1998).	39
Figura 6.12. Tensión tangencial de cortadura, (a) tensión tangencial de deslizamiento (b) y tensiones tangenciales de rodadura, (c), (Giuliano, 2009).	40

Figura 6.13. Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos a tracción y compresión (a), diagrama ensayo de tracción paralelo a las fibras (b) ensayo de tracción normal a las fibras (c) ensayo de tracción normal radial a las fibras (d). (Salas, 2013; Giuliano, 2009).	40
Figura 6.14. Entramado de vigas transversales y longitudinales en un puente de vigas (Duque, 2004).	41
Figura 6. 15 Forma de trabajo de un puente con vigas (Duque, 2004).	41
Figura 6.16. Distribución de esfuerzos por flexión (a), distribución de esfuerzos internos según la composición de una viga (b). (Duque, 2004).	42
Figura 6.17. Diagrama de momentos, donde vemos las fuerzas verticales y esfuerzos de flexión. Se pueden observar las zonas comprimidas y las zonas traccionadas, Prueba de flexión estática tradicional.	42
Figura 6.18. Forma de propagación de la onda longitudinal.	53
Figura 6.19. Forma de propagación de las Ondas Transversales	54
Figura 6.20. Tren de Ecos recibidos por la pared posterior del espécimen.	57
Figura 6.21. Desplazamiento de los rayos de luz con polarización perpendicular a través de un material birrefringente.	60
Figura 6.22. Microscopio electrónico de barrido.	61
Figura 7.1. Asignación de referencias de coordenadas para los especímenes de cubos de madera. Obsérvese la onda longitudinal y las dos ondas de corte asociadas con cada una de las tres direcciones ortogonales, es decir, las direcciones principales del material. Asignación de referencias de coordenadas para los especímenes de cubos de madera. Obsérvese la onda longitudinal y las dos ondas de corte asociadas con cada una de las tres direcciones ortogonales, es decir, las direcciones principales del material. McGovern (2001).	64
Figura 8.1. Técnica Ultrasonica de contacto.	83
Figura 8.2. Diagramas del Método de eco pulso.	83
Figura 8.3. Método de Trasmisión.	84
Figura 8.4. Método de Resonancia.	84
Figura 8.5. Fakopp Microsecond Timer (Fakopp, 2018).	85
Figura 8.6. Esquema de Equipo de Ultrasonido.	86
Figura 8.7. Pulsar/Receiver Modelo Panametrics (a) y Osciloscopio HP digital (b).	86
Figura 8.8. Transductores de onda longitudinal V103 (a), muestra de madera y transductores (b), transductor de frecuencia 1.0Mhz (c), Osciloscopio HP digital (d).	87
Figura 8.9. Transformación de un pulso en el dominio del tiempo (a), dominio de la frecuencia (b).	87
Figura 9.1. Mapa del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia, Michoacán (implanmorelia, 2016).	89
Figura 9.2. Diagrama general de procedimientos sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.	90
Figura 9. 3. Diagrama de antecedentes e inspección de procedimientos.	91
Figura 9.4. Diagrama de procedimientos para Patologías de origen biológico y Peritaje estructural sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.	91

Figura 9.5. Diagrama de Conclusiones y procesos sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.	92
Figura 9.6. Plano del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia en donde se muestran los principales Monumentos y los 3 Casos de estudio (turismocultural, 2020).	94
Figura 9.7. Diagrama de secuencia del análisis de los casos de estudio.	95
Figura 9.8. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado <i>in situ</i> .	96
Figura 9.9. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para análisis anatómico.	96
Figura 9.10. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado para muestras de laboratorio.	97
Figura 9.11. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para mediciones ultrasónicas en laboratorio.	98
Figura 9.12. Diagrama de procesamiento del material deteriorado, para caracterización química.	99
Figura 9.13. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para pruebas físico-mecánica.	99
Figura 10.1 Fachada principal de la casona propiedad del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).	101
Figura 10.2. Áreas de la casa que cuentan con plafones y área del pasillo del patio principal.	102
Figura 10.3. Elementos que conforman los Pasillos 1, 2 y 3.	103
Figura 10.4. Vista de las condiciones de las vigas que conforman el Pasillo 1 (se observa el efecto de la humedad) (a), en el pasillo 2 se muestran los daños (deformación por carga) (b), marcaciones para la toma de datos en las vigas del pasillo 3 (c).	104
Figura 10.5. Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 1.	104
Figura 10.6. Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 2.	104
Figura 10.7. Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 3.	105
Figura 10.8. Trabajos de toma de mediciones el en Pasillo 1 (Equipo Fakopp empleando ondas de esfuerzo) (a), inspección visual en el pasillo 2 (b) mediciones del porcentaje de humedad en el pasillo 3 (higrómetro eléctrico) (c).	105
Figura 10.9. Dibujo esquemático de la posición de las puntas de medición del Equipo Fakopp en los pasillos 1, 2 y 3 para la dirección longitudinal (a), dimensiones promedio de las vigas de los pasillos 1, 2 y 3 b) y dibujo esquemático de la posición de las puntas de medición del Equipo Fakopp en los pasillos 1, 2 y 3 para el sentido de medición transversal-radial (c).	107
Figura 10. 10. Dibujo esquemático de la Planta Arquitectónica del área de medición del patio central y porcentaje de Contenido de Humedad para cada uno de los pasillos 1, 2 y 3.	108
Figura 10.11. Promedio del porcentaje de humedad en cada una de las vigas de los pasillos 1, 2 y 3.	109
Figura 10.12. Promedio de la velocidad (R_T) en las vigas de los pasillos 1 y 2.	109

Figura 10.13. Promedio del Módulo de Young (R_T) en las vigas de los pasillos 1 y 2.	110
Figura 11.1. Catedral Metropolitana de Morelia y del edificio de La Mitra, fachada principal (a), pasillo de acceso al área de intervención (b), interior del área de archivo (c) y área de la azotea intervenida (d).	112
Figura 11.2. Planta arquitectónica de la Catedral Metropolitana de Morelia y del edificio de La Mitra. Tomada del expediente enviado a la UNESCO para inscribir al Centro Histórico de Morelia en la Lista del Patrimonio Cultural de la Humanidad, 1990. Copia resguardada por el Archivo Histórico Municipal de Morelia. (Aguilera, 2016).	113
Figura 11.3. Planta arquitectónica del área intervenida en la rehabilitación del edificio de La Mitra, vigas de madera recuperada (a) y vigas de madera de resiente corta (b).	113
Figura 11.4. Condiciones de la vigería en los trabajos de mantenimiento de la Catedral Metropolitana de Morelia (a, b, c, d, e, y f trabajos de remoción del terrado y vigería visto desde la azotea, g y h vista de la vigería al interior del inmueble).	114
Figura 11.5. Condiciones de las cabezas de las vigas de la Catedral Metropolitana de Morelia (a, vigería sin terrado, b y c vigería retirada).	115
Figura 11. 6. Condiciones de las cabezas de las vigas de la Catedral Metropolitana de Morelia (b, c, d, e y f vigería con posibilidades de ser reutilizada, a y b madera en pésimas condiciones fracturada al ser retirada).	115
Figura 11.7. Deterioro en los extremos de las vigas (vigas al momento de estar siendo retiradas a y condiciones de las cabezas de las vigas b).	116
Figura 11.8. Vigas del primer grupo al momento de estar siendo retiradas y clasificadas (a), vigas del primer grupo posterior a su limpieza y vigas de resiente corta (b).	117
Figura 11.9. Vigas nuevas (a, b, c, d y e) siendo evaluadas antes de ser colocadas (f y g).	118
Figura 11.10. Estrategia de muestreo para mediciones de velocidad de onda y contenido de humedad.	118
Figura 11.11. Diagrama de obtención de las probetas de madera sana y madera deteriorada empleadas en las mediciones de Ultrasonido y análisis químico, medición de peso de probetas (a), probetas de madera sana(b), probetas de madera deteriorada (c) y grupo de probetas de madera deteriorada de la viga 1 (d).	119
Figura 11.12. Diagrama de obtención de las probetas de madera nueva y deteriorada empleadas en las mediciones de ultrasonido. a cabezas de vigas nuevas (recuadro azul) y deterioradas (recuadro rojo), b secciones de vigería proveniente de la vigería nueva (recuadro azul) y deteriorada (recuadro rojo), c muestras para microscopio electrónico de barrido (recuadro rojo).	120
Figura 11.13. Diagrama de las zonas de extracción del material para pruebas químicas (a), estado del material para análisis (b), corte de viga donde se observa la albura y el duramen (c), astillas de duramen deteriorado (d) y astillas de albura deteriorado (e).	121

- Figura 11.14.** Condiciones de las vigas de madera recuperada (deterioradas) (a, b, c, d y e) que se encontraban en el entramado del techo siendo evaluadas (f y g). 122
- Figura 11.15.** Referencia de coordenadas seleccionada para las muestras de cubo de madera. Tenga en cuenta que la primera letra indica la dirección principal de la muestra de cubo de madera longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) mientras que la segunda letra indica la dirección de polarización de la onda ultrasónica. 124
- Figura 11.16.** Dibujos esquemáticos de las formas de medición con la onda longitudinal de las muestras de la madera. 125
- Figura 11.17.** Dibujos esquemáticos de las formas de medición con la onda transversal de las muestras de la madera. 125
- Figura 11.18.** Diagrama de Flujo de la estructura jerárquica de madera. 126
- Figura 11.19.** Muestras tratadas (recuadro verde) muestras deterioradas (recuadro rojo) y muestras sanas (recuadro azul), b aparato de pulverización catódica (técnica Sputtering), c montura de aleación de Aluminio y muestras tratadas y d microscopio electrónico de Barrido. 127
- Figura 11.20.** Dibujo esquemático de captura de imágenes en el Microscopio Electrónico de Barrido (a), muestras deterioradas (recuadro rojo) y muestras sanas (recuadro azul). 128
- Figura 11.21.** Obtención del contenido de humedad para análisis químico Molino Willey (a), tamizado de las muestras (b), estufa (c) y muestras estabilizadas (d). 129
- Figura 11.22.** Etapas del proceso de obtención de cenizas, crisol de níquel en tratamiento (a), placa de calentamiento con las muestras (b), mufla para proceso de calcinación (c) pesado de cenizas posterior al enfriamiento(d) y cenizas (e). 130
- Figura 11.23.** Medición de pH con potenciómetro para el análisis químico en duramen sano y duramen deteriorado (a) y duramen deteriorado, potenciómetro marca Conductronic pH 120 (b). 130
- Figura 11.24.** Matraz con 2 g de harina de madera (a), matraz con harina de madera y 100 ml de NaOH al 1.0% (b), muestras en baño de agua durante 60 minutos (c). 131
- Figura 11.25.** Muestras después del tratamiento en baño de agua (a), material filtrado y lavado con 100 ml de agua caliente, neutralizado en dos etapas con 25 ml de ácido acético al 10% (b) y muestras del material libre de ácido para albura y duramen sano y deteriorado (c). 131
- Figura 11.26.** Muestras para extracción en Equipo Solxhlet (a), solventes de forma secuencial y de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente (b), Equipo Solxhlet para la determinación del contenido de extraíbles (c), Equipo Solxlet para la determinación con solventes ciclohexano, acetona y metanol (d), Equipo Solxhlet para la determinación agua caliente (e), cartuchos. 132
- Figura 11.27.** Extractos obtenidos con Equipo Solxhlet para la determinación con solventes ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente (a), equipo de rotavapor para obtención de extraíbles (b), Evaporación del solvente

resultante (c), Material filtrado (d) y obtención de harina libre de extraíbles (e).	132
Figura 11.28. Muestras de harina libres de extraíbles (a), muestras en una solución de ácido acético y clorito de sodio (b), muestras a Baño María (c), muestras posteriormente al tratamiento (d), muestras y filtros (e).	133
Figura 11.29. Filtros de vidrio para aplicar vacío (a), filtros en estufa de secado (b) y obtención de Holocelulosa (c).	133
Figura 11.30. Harina libre de extraíbles (a), harina libre de extraíbles en ácido sulfúrico (b), Soluciones de las muestras sometidas a ebullición (c), muestras en filtro para lavado (d), muestras a la estufa para peso constante lignina (e).	134
Figura 11.31. Comparación del Contenido de Humedad para las vigas de madera de reciente corta y las vigas de madera de recuperación <i>in situ</i> .	137
Figura 11.32. Gráfica de la comparación del promedio de la Densidad para los dos grupos de vigas sanas y deterioradas.	138
Figura 11.33. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	140
Figura 11.34. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido T_R .	141
Figura 11.35. Gráfica del promedios de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en los sentidos L_L y T_R .	141
Figura 11.36. Gráfica del promedio de mediciones del Módulo de Young con de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	142
Figura 11.37. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo en el sentido T_R de medición.	143
Figura 11.38. Gráfica del promedio de la v del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L y T_R .	143
Figura 11.39. Promedio de la velocidad longitudinal de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	144
Figura 11.40. Promedios de la velocidad longitudinal de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .	145
Figura 11.41. Gráfica del promedios de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .	145
Figura 11.42. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	146
Figura 11.43. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	147
Figura 11.44. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .	147

Figura 11.45. Gráfica de las mediciones del Módulo de Young de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .	148
Figura 11.46. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de los Módulos de Young por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.	149
Figura 11.47. Gráfica del promedio de la atenuación con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .	150
Figura 11.48. Gráfica del promedio de la Atenuación (b) con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .	150
Figura 11.49. Gráfica del promedio de la Atenuación (b) con de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .	151
Figura 11.50. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de la Atenuación por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.	151
Figura 11.51. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .	152
Figura 11.52. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .	153
Figura 11.53. Gráfica del promedios de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .	153
Figura 11.54. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .	154
Figura 11.55. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .	154
Figura 11.56. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_L .	155
Figura 11.57. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición.	156
Figura 11.58. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .	156
Figura 11.59. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .	157
Figura 11.60. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .	157
Figura 11.61. Gráfica del promedios del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .	158
Figura 11.62. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos.	158

Figura 11.63. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .	159
Figura 11.64. Gráfica del promedio de mediciones de las mediciones de los Módulos de Young por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.	160
Figura 11.65. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .	161
Figura 11.66. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .	161
Figura 11.67. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .	162
Figura 11.68. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .	162
Figura 11.69. Grafica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_L .	163
Figura 11.70. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .	163
Figura 11.71. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de la Atenuación por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.	164
Figura 11.72 Promedios de las mediciones de la velocidad longitudinal en las direcciones longitudinal (L_L), tangencial- radial (T_R) de las vigas sanas y deterioradas con el método de ondas de esfuerzo (e) y ultrasonido (u), para la viga sana 1 y deteriorada 1 (a), la viga sana 2 y deteriorada 2 (b) y para la viga sana 3 y deteriorada 3 (c), promedios de la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido (d).	166
Figura 11.73 Promedios de las mediciones de la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido con la técnica de emisión transmisión.	167
Figura 11.74. Promedios de las mediciones del Módulo de Young empleando la velocidad longitudinal en las direcciones longitudinal (L_L), tangencial-radial (T_R) de las vigas sanas y deterioradas con el método de ondas de esfuerzo (e) y ultrasonido (u), para la viga 1 sana y 1 deteriorada (a), la viga 2 sana y 2 deterioradas (b) y para la viga 3 sana y 3 deteriorada (c),), promedios del Módulo de Young calculado con la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido (d).	168
Figura 11.75. Mediciones por medio de ultrasonido para la madera en L_L , T_T y R_R .	169

Figura 11.76. Promedios de las mediciones del Módulo de Young con la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido con la técnica de emisión transmisión.	170
Figura 11.77. Histograma de las distribuciones de probabilidad para la dirección longitudinal (L_T y L_R), la dirección radial (R_L y R_T) y la dirección tangencial (T_L y T_R) para muestras de madera de reciente corta (sana) y la madera de recuperación (deteriorada).	172
Figura 11.78. SEM de una sección transversal de las direcciones principales Longitudinal (arriba) Radial (centro) y Tangencial (abajo) de la muestra de cubo de madera para madera de reciente corta y madera de recuperación tomada con electrones secundarios.	173
Figura 11.79. Grado de anisotropía por mediciones ultrasónicas para muestras recientes y de madera.	174
Figura 11.80. SEM de las secciones de las muestras de las vigas sanas, corte transversal a $200\mu\text{m}$ (a viga 1, b viga 2 y c viga 4).	174
Figura 11.81. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte transversal a $200\mu\text{m}$ (a viga 1, a $400\mu\text{m}$, b viga 3 a, a $200\mu\text{m}$ y c viga 2, a $200\mu\text{m}$).	175
Figura 11.82. SEM de las secciones de las muestras de las vigas de madera sana, corte radial a $200\mu\text{m}$ (a viga 1n, b viga 2 n y c viga 3n).	175
Figura 11.83. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte radial (a viga 1 a, $200\mu\text{m}$, b viga 2 a, $300\mu\text{m}$ y c viga 4 a, $200\mu\text{m}$).	176
Figura 11.84. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte radial (a viga 4, a $200\mu\text{m}$, b viga 2, a $400\mu\text{m}$ y c viga 3 a, $400\mu\text{m}$).	177
Figura 11.85. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a $200\mu\text{m}$, (a viga 1n, b viga 2 n y c viga 3n).	177
Figura 11.86. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a $200\mu\text{m}$, (a viga 1, b viga 2 y c viga 4).	178
Figura 11.87. EM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a $200\mu\text{m}$, (a viga 1n, b viga 4 y c viga 2).	178
Figura 11.88. Obtención del porcentaje de cenizas para análisis químico en albura sana, albura deteriorada, duramen sano y duramen deteriorado para las 5 muestras.	180
Figura 11.89. Porcentaje de sustancias inorgánicas en madera de recuperación.	181
Figura 11.90. Obtención del contenido de humedad para análisis químico en albura sana, albura deteriorada, duramen sano y duramen deteriorado para las 5 muestras.	182
Figura 11.91. Obtención del porcentaje de pH, para el análisis químico en albura (a) y duramen (b).	183
Figura 11.92. Graficas del porcentaje de extraíbles solubles en sosa para albura y duramen, para todas las vigas.	184
Figura 11.93. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de ciclohexano para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).	185
Figura 11.94. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de acetona para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).	186
Figura 11.95. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de metanol para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).	187

Figura 11.96. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de agua caliente para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).	188
Figura 11.97. Valores de extraíbles totales por viga empleando equipo Soxhlet (albura y duramen, sano y deteriorado).	188
Figura 11.98. Valores de rendimiento de los solventes empleando equipo Soxhlet para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.	189
Figura 11.99. Valores de extraíbles totales empleando equipo Soxhlet (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.	189
Figura 11.100. Valores de holocelulosa (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga 2 sana y las vigas 1, 2, 4 y 5.	190
Figura 11.101. Obtención del porcentaje de lignina para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).	192
Figura 11.102. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa para la viga 2 sana.	193
Figura 11.103. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa para las vigas de madera de recuperación 1 (a), 2 (b), 4 (c) y 5 (d).	193
Figura 11.104. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.	194
Figura 12.1. Fachada lateral y acceso del edificio del Palacio Federal que se ubica en la Avenida Madero Oriente N. 369.	198
Figura 12.2. Área de intervención del Palacio Federal, planos del área de sustitución de viguería (a) y plano de la escalera del tapanco (b).	199
Figura 12.3. Área de intervención del Palacio Federal, vigas en la primera etapa de los trabajos de sustitución (a), dibujo esquemático de la adecuación del área (b).	199
Figura 12.4. Elementos estructurales que presentan ataque biológico pertenecientes al edificio conocido como Palacio Federal (a, b y c).	200
Figura 12.5. Viguería del cuarto azul siendo retirada y colocada en el patio (a) selección del material para cortes y posible reubicación (b y c).	202
Figura 12.6. Viguería del cuarto azul al momento de estar siendo desmontadas del edificio (a y c) y su colocación en el patio una vez que fue retirada (c).	203
Figura 12.7. Viguería del cuarto azul antes de ser retirado (a), después de retirar la duela superior (b), retiro del terrado (c), de enladrillado (d y e) y desmonte de vigas (f) del entrepiso.	203
Figura 12.8. Viguería de madera de reciente corta al momento de su llegada a para ser tratada.	204
Figura 12.9 Viguería de madera de reciente corta antes del tratamiento de preservado (a), viguería siendo retirada del tanque de vacío posterior al tratamiento (b y c).	204
Figura 12.10. Viguería de madera de reciente corta después del tratamiento de preservado en el proceso de espejeado (a, b y c).	205

Figura 12.11. Material de donación del Edificio conocido como Palacio Federal, selección y medición de vigas (a y b), corte de las secciones de donación (c y d), cabezas ya cortadas y almacenadas (e y f).	206
Figura 12.12. Material de donación siendo cortado para la realización de probetas (a), cortes de viga (b), selección y clasificación de probetas (c), probetas para pruebas físico-mecánicas (d).	206
Figura 12.13. Viguería nueva siendo colocada (a, b y c).	207
Figura 12.14. Viguería nueva, enladrillado (a), terrado (b) y duela ya colocados (c) en el edificio.	207
Figura 12.15. Área de intervención del Palacio Federal ya terminada (a, b y c).	208
Figura 12.16. Viguería sana (a) y deteriorada (b) utilizada para las mediciones con ondas de esfuerzo.	208
Figura 12.17. Plan de muestreo para las mediciones del contenido de humedad y de la velocidad de onda en la viguería sana y viguería deteriorada utilizada para las mediciones con ondas de esfuerzo.	209
Figura 12.18. Mediciones de la viguería sana (a, b y c) y deteriorada (d y e) con el equipo Fakoop.	209
Figura 12.19. Mediciones del % de humedad en la viguería deteriorada (a) y en la viguería sana (b).	210
Figura 12.20. Probetas para ensayo flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra.	212
Figura 12.21. Probeta para ensayo de flexión y accesorios utilizados.	213
Figura 12.22. Ensayos de flexión del Caso 3, falla de tensión simple (a), falla de tensión en sentido contrario de las fibras (b), falla de tensión astillada (c).	214
Figura 12.23. Probetas Caso 3 en ensayo de compresión paralela a la fibra, falla de tipo cuña penetrante (a), aplastamiento (b), cortante (c), rajadura (d), compresión y cortante paralela a la fibra (e) y falla en forma de punto de escoba o astilla (f).	215
Figura 12.24. Probetas Caso 3 en ensayo de compresión perpendicular a la fibra, falla de cortante (a), compresión y cortante paralela a la fibra (b) y aplastamiento (c).	216
Figura 12.25. Contenido de humedad de los elementos de madera nueva.	217
Figura 12.26. Contenido de humedad de los elementos de madera deteriorada.	218
Figura 12.27. Porcentajes del contenido de humedad de los elementos de madera sana y de madera deteriorada por viga.	218
Figura 12.28. Porcentajes del contenido de humedad de los elementos de madera sana y deteriorada.	219
Figura 12.29. Velocidad en el sentido longitudinal de la madera para los dos grupos.	219
Figura 12.30. Promedio de la Velocidad en el sentido transversal radial para los dos grupos de madera.	220
Figura 12.31. Promedio de la Velocidad en el sentido longitudinal de la madera para los dos grupos.	220
Figura 12.32. Promedio del Módulo de Young en el sentido L_T empleando ondas de esfuerzo.	221

Figura 12.33. Promedio del Módulo de Young en el sentido L, T y R empleando ondas de esfuerzo.	221
Figura 12.34. Promedio general del Módulo de Young en el sentido L, T y R empleando ondas de esfuerzo.	222
Figura 12.35. Promedio del Módulo de Young en el sentido T_R empleando ondas de esfuerzo en la zona de las cabezas de las vigas.	223
Figura 12.36. Gráfica del módulo de Young en los tres sentidos principales de la madera.	224
Figura 12.37. Gráfica de esfuerzo-deformación obtenido a partir de pruebas físico-mecánicas en ensayo de flexión.	224
Figura 12.38. Gráfica del Módulo de corte obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.	225
Figura 12.39 Promedio del Módulo de corte obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.	226
Figura 12.40. Gráfica del promedio general del Módulo de ruptura obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.	226
Figura 12.41 Gráfica de resultados de las pruebas Físico-mecánicas para la prueba de compresión paralela a la fibra.	226
Figura 12.42. Gráfica de esfuerzo de deformación de los valores promedio de máximos, mínimos e intermedios del ensayo de compresión paralela a la fibra.	228
Figura 12.43. Gráfica de resultados de las pruebas Físico-mecánicas para la prueba de compresión perpendicular a la fibra.	229
Figura 12.44. Gráfica de esfuerzo en el límite proporcional de los valores promedio de máximos, mínimos y promedios para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra.	229
Figura 12.45. Promedios del cálculo del módulo de Young para pruebas físico-mecánicas en el sentido L, T y R.	231
Figura 12.46. Promedios del cálculo del módulo de Young para pruebas físico-mecánicas en el sentido L_R , L_T y R_T .	231
Figura 12.47. Promedio general del Módulo de Young en el sentido T_R en el material de las cabezas de las vigas (empleando ondas de esfuerzo y ensayos Físico-mecánicos).	232
Figura 12.48. Promedio del % CH en las vigas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.	233
Figura 12.49 Promedio del % CH en las vigas sanas, deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.	233
Figura 12.50. Promedio del número de anillos de crecimiento en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos Físico-mecánicos.	234
Figura 12.51. Promedio general del número de anillos de crecimiento en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.	234
Figura 12.52. Promedio de la densidad en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.	235
Figura 12.53. Promedio general de la densidad en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos Físico-mecánicos.	235

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Contenido de Humedad.	21
Ecuación 2. Obtención de volumen.	21
Ecuación 3. Obtención de la masa.	21
Ecuación 4. Obtención de densidad	21
Ecuación 5. Dimensiones del Módulo de Young.	34
Ecuación 6. Módulo de Young.	34
Ecuación 7. Módulo de Corte S o Tensión cortante.	39
Ecuación 8. Esfuerzo por unidad de área.	39
Ecuación 9. Relación de Deformación angular.	39
Ecuación 10. Onda acústica.	54
Ecuación 11. Velocidad de fase.	54
Ecuación 12. Velocidad de las ondas longitudinales.	54
Ecuación 13. Velocidad de las ondas transversales.	54
Ecuación 14. Valores de rigidez diagonales.	56
Ecuación 15. Aproximación del módulo de Young a los valores de rigidez.	56
Ecuación 16. Módulo de Corte.	56
Ecuación 17. Coeficiente de atenuación.	56
Ecuación 18. Velocidad de propagación en el material.	57
Ecuación 19. Pérdida total de la atenuación.	58
Ecuación 20. Coeficiente de atenuación.	59
Ecuación 21. Obtención de la birrefringencia acústica.	60
Ecuación 22. Módulo de Young.	123
Ecuación 23. Umbral de detección de la técnica ultrasónica de emisión transmisión.	127
Ecuación 24. Obtención del % de humedad.	129
Ecuación 25. Obtención de % de cenizas.	130
Ecuación 26. Obtención del % de extraíbles.	132
Ecuación 27. Obtención del % de Holocelulosa.	133
Ecuación 28. Obtención del % de Lignina.	134
Ecuación 29. Módulo de ruptura.	213
Ecuación 30. Módulo de elasticidad.	213
Ecuación 31. Compresión paralela a la fibra.	215

Índice de anexos

Anexo 1. Análisis de Varianza y Correlación de la Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo para los dos tipos de muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R .	272
Anexo 2. Análisis de Varianza y Correlación de la Velocidad Longitudinal, el Módulo de Young y la Atenuación con la Velocidad Longitudinal para las muestras de los dos grupos de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R .	272

Anexo 3. Análisis de Varianza y Correlación de la Velocidad Transversal, el Módulo de Corte y la Atenuación para las muestras de los dos grupos de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T .	274
Anexo 4. Módulo de Corte para los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición.	275
Anexo 5. Atenuación Ultrasonica para los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición.	276
Anexo 6. Resultados y análisis para las mediciones del contenido de sustancias inorgánicas (porcentaje de cenizas) para albura y duramen (sano y deteriorado).	277
Anexo 7. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de pH para albura y duramen (sano y deteriorado).	277
Anexo 8. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Solubilidad a la sosa (extraíbles solubles en sosa) para albura y duramen (sano y deteriorado).	278
Anexo 9. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Ciclohexano para albura y duramen (sano y deteriorado).	278
Anexo 10. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Acetona para albura y duramen (sano y deteriorado).	279
Anexo 11. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Metanol para albura y duramen (sano y deteriorado).	279
Anexo 12. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Agua caliente para albura y duramen (sano y deteriorado).	280
Anexo 13. Holeocelulosa.	280
Anexo 14. Sustancias extraíbles.	281
Anexo 15. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Lignina Runkel para albura y duramen (sano y deteriorado).	281
Anexo 16. Análisis de varianza y Correlación de la velocidad de onda madera sana y deteriorada (sentido LL). En la Velocidad de onda en el sentido LL entre los dos grupos de vigas.	283
Anexo 17. Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las vigas de material deteriorado.	286
Anexo 18. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para el Módulo de Corte del Caso 3.	289
Anexo 19. Resultados y análisis de los promedios generales de los ensayos Físico-mecánicos y de Ondas de Esfuerzo para la madera de la zona de las cabezas de las vigas.	291

Resumen

Esta propuesta se deriva de la investigación interdisciplinaria que se desarrollo en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La presente investigación se enfocó al análisis de viguería de madera a nivel laboratorio e *in situ*, por medio de técnicas no destructivas, pruebas físico-mecánicas, microscopia electrónica de barrido y caracterización básica química.

Se analizaron tres casos, todos considerados como monumentos históricos (Centro Histórico de la ciudad), ubicados en la ciudad de Morelia Michoacán, México. El Primero fue un edificio situado en la Av. Madero Oriente N. 799, esta edificación fue construida originalmente como casa habitación, en la actualidad es un recinto que alberga las oficinas del Centro INAH Michoacán y forma parte de los bienes del Instituto. El segundo caso es el edificio de La Mitra ubicado a un costado de La Catedral Metropolitana de Morelia (1660 a 1744). Finalmente, el tercer caso es el Edificio conocido como Palacio Federal, el cual está ubicado en la Av. Madero Oriente N. 369.

El material analizado fue madera que en su momento perteneció a las edificaciones anteriormente mencionadas (madera de recuperación) y madera de resiente corta, la cual sustituyó a la anterior en trabajos de rehabilitación y mantenimiento de estos. El material fue analizado primero *in situ*, y posteriormente se estabilizo en sus porcentajes de contenido de humedad para poder ser ajustado a los requerimientos para cada uno de los análisis a los que fue sometido.

El objetivo principal de esta investigación fue el desarrollo de una metodología basada en técnicas no destructivas para ser empleada en el diagnóstico de los elementos estructurales de madera en los monumentos históricos. Efectuando una caracterización de la madera estructural de gran escuadría, de los casos ya mencionados, para lo cual se ensayó una metodología que permitió ampliar estudios anteriores realizados.

Se contemplaron Técnicas de Inspección Visual, métodos no Destructivos de Ultrasonido, pruebas físico-mecánicas, microscopia electrónica de barrido y caracterización básica química, de manera que fue posible asignar las respectivas propiedades mecánicas al material. Con este estudio se comprobó la viabilidad de efectuar una mejor clasificación de la madera estructural previo a una posible intervención que contemple el sustituir ciertos

elementos estructurales, que pudiesen presentar daños de fatiga y por lo tanto, un riesgo para la seguridad de las personas y del edificio.

Finalmente, las ventajas de estas técnicas son su relativa facilidad de aplicación en obra y la respuesta fiable en los resultados. La metodología de trabajo no destructiva predictora de la densidad y detectora de daños bióticos, se demostró que para la futura toma y análisis de datos estos métodos son confiables y aplicables a cualquier edificación de estas características. Basada en equipos portátiles, de fácil manejo y apta para su empleo en piezas estructurales de madera puestas en obra, pudieron mejorar los diagnósticos de la clasificación visual en edificaciones de carácter histórico, enfocadas especialmente a la restauración y rehabilitación de estas.

El proceso de recuperación y restauración de Sitios y Monumentos Históricos en el punto que concierne a la madera estructural tiene una repercusión en los entornos urbanos y rurales que pocas veces se contempla. Esta propuesta de investigación pretende hacer visible esto a través de trabajos interdisciplinarios.

Abstract

This proposal is derived from the interdisciplinary research that was developed in the Faculty of Engineering in Wood Technology, at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. The present investigation focused on the analysis of wooden beams at the laboratory and in situ level, through non-destructive techniques, physical-mechanical tests, scanning electron microscopy and basic chemical characterization.

Three cases were analyzed, all considered as historical monuments (Historic Center of the city), located in the city of Morelia, Michoacán, Mexico. The first was a building located at Av. Madero Oriente N. 799, this building was originally built as a residence, currently it is an enclosure that houses the offices of the INAH Michoacán Center and is part of the Institute's assets. The second case is the building of La Mitra located next to the Metropolitan Cathedral of Morelia (1660 to 1744). Finally, the third case is the building known as the Federal Palace, which is located at Av. Madero Oriente N. 369.

The material analyzed was wood that at the time belonged to the aforementioned buildings (recovery wood) and short resent wood which replaced the previous one in rehabilitation and maintenance works.

The material was first analyzed in situ, and later its moisture content percentages were stabilized in order to be adjusted to the requirements for each of the analyzes to which it was subjected.

The main objective of this research was the development of a methodology based on non-destructive techniques to be used in the diagnosis of structural wooden elements in historical monuments. Carrying out a characterization of the structural wood of great squareness, of the cases already mentioned, for which a methodology was tested that allowed expanding previous studies carried out.

Visual Inspection Techniques, non-destructive Ultrasound methods, physical-mechanical tests, scanning electron microscopy and basic chemical characterization were considered, so that it was possible to assign the respective mechanical properties to the material. With this study, the feasibility of carrying out a better classification of structural wood was verified prior to a possible intervention that contemplates replacing certain structural elements, which could present fatigue damage and therefore a risk to the safety of people and the building.

Finally, the advantages of these techniques are their relative ease of application on site and the reliable response in the results. Using the non-destructive density predictor and biotic damage detection methodology, we demonstrate that these methods are reliable and applicable to any building with these characteristics for future data collection and analysis. Based on portable equipment, easy to use and suitable for use in structural pieces of wood placed on site, they were able to improve visual classification diagnoses in historic buildings, especially focused on their restoration and rehabilitation.

The process of recovery and restoration of Historic Sites and Monuments at the point that concerns structural wood has an impact on urban and rural environments that is rarely contemplated. This research proposal aims to make this visible through interdisciplinary work.

1. Introducción

La conservación y mantenimiento preventivo es la mejor forma de evitar la degradación de los elementos estructurales de la arquitectura patrimonial edificada con madera. En el deterioro y daño, que en algunas ocasiones resulta irreversible, de este patrimonio.

La madera como material estructural, siendo históricamente el más utilizado y uno de los más demandados en nuestros días, se encuentra en la actualidad con una serie de dificultades cuyos orígenes se centran, básicamente, en el olvido de algunos de los oficios tradicionales vernáculos y a la falta de profesionistas dedicados a la construcción que cuenten con una especialización en el área de maderas, que puedan dar respuestas a estos problemas. En claro contraste con otros materiales de reciente y fuerte implantación como el hormigón, el acero el vibrio y otros materiales compuestos que en la actualidad se utilizan en el ámbito de la construcción.

En la actualidad, el patrimonio religioso mueble e inmueble con características constructivas y tradiciones vernáculos es una de las tipologías que más riesgo corre y requiere un cuidado especial, no solo para su protección como monumento histórico, sino también en su gestión como recurso turístico cultural (ICOMOS, 2000, pp. 3-4; Hiriart, 2022).

“Estas construcciones utilizan la madera como componente principal en la estructura de la cubierta y, además, como elemento decorativo, en techos interiores, retablos y mobiliario diverso de excepcional valor artístico (Hiriart, 2022).

Las ventajas de la madera como material estructural son indiscutibles y su presencia forma parte de las características propias de todo edificio histórico del Periodo Colonial de México, tanto estructuralmente como en los elementos con un valor artísticos (pinturas, imágenes, retablos, mobiliario etc.). Por lo que es necesario profundizar en su conocimiento para dar respuesta a las demandas actuales. Las carencias detectadas están casi siempre relacionadas con la dificultad para evaluar las propiedades mecánicas y resistentes de la madera como material estructural.

En los últimos años ha habido un resurgimiento de la madera en su función estructural, desde la fase de proyecto hasta la fase de ejecución de cualquier obra con madera. La falta de conocimiento y de herramientas de trabajo para los técnicos hasta la escasa mano de obra calificada para el levantamiento de las estructuras de madera, pasando por el suministro del material y los controles de calidad, hacen de esta labor una situación compleja.

La producción de arquitectura religiosa del siglo XVI es un acervo importante para el estado de Michoacán, el cual se debe de conservar; Hiriart (2022) menciona que existe una cantidad considerable de estas edificaciones, construidas durante el proceso de evangelización y conquista de los pueblos prehispánicos que formaron parte del Imperio P'urepecha, las cuales cuentan con elementos estructurales de madera y que en la actualidad corren diversos riesgos que podrían comprometerlas y provocar su pérdida.

“Estas edificaciones vernáculas son producto de una mezcla cultural que fusionó materiales y sistemas constructivos locales con el trabajo indígena y las prácticas constructivas de los evangelistas. La madera fue el material más utilizado en las construcciones religiosas; como elemento estructural en cubiertas, artesonados interiores y en la ornamentación que decora templos y capillas (Hiriart, 2022).

Las estructuras de madera del patrimonio se caracterizan por una organización jerárquica de sistemas, unidades y elementos, con conexiones que juegan un papel fundamental en la transferencia de carga. Las características en las diferentes escalas de la estructura y las interdependencias entre los niveles jerárquicos deben analizarse y los datos deben recopilarse de manera armonizada, para su evaluación exhaustiva (Cavalli *et. al.*; 2013; Cavalli *et. al.*, 2016).

La inspección y el diagnóstico son necesarios para identificar las lesiones, las deficiencias, y para analizar las causas de los procesos patológicos. La importancia de un levantamiento geométrico preciso ha sido subrayada por muchos autores que se han ocupado de la valoración de estructuras de madera (Branco *et al.*, 2010; Osuna-Sequera *et al.*, 2020).

Se han identificado tres aspectos relevantes: el control de la humedad, las posibles sobrecargas debidas a los añadidos en los procesos de reparación y restauración, y la falta de mantenimiento y adecuada protección que se le da a las de madera. Se suma también la poca comprensión que se tiene en algunas intervenciones del comportamiento de las estructuras de madera de los monumentos históricos. Todos estos factores, como problemática identificada, influyen drásticamente en la protección de este patrimonio y hacen de su atención y conservación una operación compleja. Estas causas están relacionadas fundamentalmente con la naturaleza orgánica de la madera. La causa más importante de decisiones equivocadas en cualquier proceso es la falta de información o de métodos adecuados que lleven a una correcta interpretación de las condiciones reales en las que se encuentran los elementos estructurales de madera, previo a las intervenciones restauratorias.

Los peligros naturales y antrópicos han sido una amenaza permanente y un factor constante en el deterioro y pérdida de las innumerables muestras del patrimonio religioso de México. Los

incendios en recintos religiosos son otra de las causas que más afectan a los bienes culturales de madera. Uno de los ejemplos más notables en los cuales la madera no solo era un elemento estructural fue el Templo de Santiago Apóstol edificio arquitectónico de tipo religioso, ubicado en la comunidad de Nurio, en la Sierra P'urépecha, el cual el 7 de marzo de 2021 sufrió un incendio que destruyó el inmueble (Hiriart, 2022).

“Este evento nos permite analizar las debilidades en los marcos legales para la protección y conservación de este patrimonio religioso único en México. Asimismo, plantea un debate crítico y propositivo sobre la vulnerabilidad, la prevención de riesgos y la necesidad de implementar planes de manejo del patrimonio religioso ubicado en las comunidades indígenas” (Hiriart, 2022).

Ejemplos como este podemos encontrar varios y todos nos llevan a pensar que es necesario mejorar las acciones ya existentes para la prevención, conservación rehabilitación y restauración de nuestro patrimonio. Se requiere de la realización de trabajos interdisciplinarios que promuevan y faciliten esta labor contemplando la variedad de edificaciones y sus problemáticas desde lo legal, lo turístico, lo técnico, lo histórico, lo económico, etc.

2. Planteamiento del problema

Se puede mencionar que en los últimos 15 años ha habido un crecimiento constante de estudios y trabajos que pretenden crear normativas que contemplen medidas específicas para la madera de recuperación con el fin de conservar el patrimonio cultural en madera; demostrando la necesidad de mejores enfoques metodológicos para la inspección, conservación, mantenimiento y restauración de esta. Estructuras de madera como parte del patrimonio cultural son artefactos importantes, en muchos casos con una alta importancia histórica y cultural (Machado *et al.*, 2015; Macchioni *et al.*, 2018; Regio *et al.*, 2018).

“Es importante subrayar un principio fundamental de la UNESCO, en el sentido de que el patrimonio cultural de cada uno es el patrimonio cultural de todos. La responsabilidad por el patrimonio cultural y su gestión corresponde, en primer lugar, a la comunidad cultural que lo ha generado, y después a la que lo tiene bajo su cuidado” (Nara, 2019).

La prevención de riesgos es uno de los principales retos a los que se enfrenta la conservación de sitios y monumentos a nivel mundial. Las principales propuestas de actuación en estos casos se encuentran contenidos en “Principios que deben regir la Conservación de las Estructuras Históricas en Madera” adoptados por ICOMOS en la 12ª Asamblea General en México, en Octubre de 1999, el cual a seguido un proceso de mejoras que comenzó en Guadalajara, México (2012) y continuó en Himeji, Japón (2013) y Falun, Suecia (2016). Cuyo

objetivo es el definir los principios básicos y prácticas pertinentes en la más extensa variedad de casos internacionales para la protección y conservación del patrimonio construido en madera con respecto a su significado cultural, así en 2017 fue la última reforma de estos conceptos de conservación y prevención aplicados a las estructuras de madera (ICOMOS, 2017).

“La pérdida de identidad y homogenización de los valores culturales en un mundo globalizado en donde existe una búsqueda de un nuevo lenguaje que exprese más nuestro tiempo y que a su vez permita hacer una proyección a un futuro donde este incluido el legado cultural y sea un apoyo para el progreso de la sociedad; es un punto importante de observar en el tema de la conservación” (Hiriart, 2013, pp 46-63).

Las palabras “patrimonio construido en madera” se refieren a todos los tipos de edificios y estructuras de madera que tienen significado cultural o son parte de lugares históricos, e incluye estructuras temporales, móviles y evolutivas (ICOMOS, 2017). En la actualidad el enfoque del concepto de Monumento Histórico se puede entender a partir de qué;

“La conservación del patrimonio cultural en todas sus formas y periodos históricos se Fundamenta en los valores atribuidos al patrimonio. Nuestra capacidad para comprender estos valores depende, en parte, del grado en el cual las fuentes de información sobre estos valores puedan considerarse como creíbles y verídicas” (Documento de Nara, 2019).

El Patrimonio Histórico exige una comprensión profunda de sus estados actuales y pasados, incluidos los aspectos de su conservación, mantenimiento y uso. La evaluación estructural es también el primer paso hacia una intervención que puede abarcar desde la mera preservación de un artefacto artístico hasta la rehabilitación completa de una función estructural, para preservarla o adaptarla para uso futuro (Riggio, 2017).

“La disciplina de la conservación de bienes patrimoniales edificados evoluciona a partir de la década de los años sesenta, reconociendo diversas tipologías arquitectónicas y representaciones del espacio urbano patrimonial y de Conjuntos Históricos a la vez que adquiere connotaciones más amplias e incluyentes, así como nuevos valores” (Hiriart, 2013, pp. 64-87).

Existen factores específicos de las estructuras de madera de importancia primaria para la comprensión de su comportamiento, que hacen de su evaluación una operación compleja y distinta. Todos estos factores están relacionados fundamentalmente con la naturaleza orgánica de la madera, a diferencia de otros materiales de construcción, y aunque son diversos, todos son estrictamente interdependientes en su efecto sobre la respuesta estructural de las estructuras de madera (Riggio, 2017).

México es uno de los 162 países que cuentan con lugares denominados como Patrimonio Mundial; siendo el tercer país con el mayor número de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio: tiene actualmente 10 ciudades, tan sólo 6 menos que Italia y 5 menos que España. El Estado de Michoacán cuenta con una ciudad denominada como patrimonio de la humanidad y con 8 localidades denominadas como pueblos Mágicos, ambas denominaciones son otorgadas previo un estudio que califica diferentes puntos, entre los cuales se encuentra su patrimonio arquitectónico; esto les permite acceder a programas que fomentan el desarrollo y la conservación de estos lugares (ICOMOS, 1999).

La filosofía que respalda a la Convención del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la UNESCO es que existen partes de este legado de un valor tan extraordinario para el mundo entero que su protección, conservación, y transmisión a las generaciones venideras concierne no ha una nación determinada, sino a toda la comunidad internacional (UNESCO, 1972).

Los principios de la conservación de las estructuras históricas en madera están contenidos en el estatuto Principios para la Conservación del Patrimonio construido en madera adoptados por ICOMOS en la 19a Asamblea General en Delhi, India, Diciembre 2017. Este documento tiene por finalidad definir los principios y métodos de actuación fundamentales y universalmente aplicables para la protección y conservación de las estructuras históricas en madera, de tal forma que se respete su significado cultural.

En este contexto se entiende que las estructuras históricas en madera hacen referencia a todo tipo de construcción o edificio hecho en madera, total o parcialmente, que tenga un significado cultural o que forme parte de un sitio histórico (ICOMOS, 2017). Para la conservación de dichas estructuras, se deben seguir estos principios:

- “Reconocen y respetan la importancia del patrimonio construido en madera, sus sistemas estructurales y sus detalles de todas las épocas como parte del patrimonio cultural del mundo;
- Tienen en cuenta y respetan la gran diversidad del patrimonio construido en madera, y todo patrimonio intangible asociado; reconocen que el patrimonio en madera ofrece evidencia de las destrezas de los carpinteros y constructores y su conocimiento cultural, tradicional y ancestral;
- Entienden la continua evolución de los valores culturales a través del tiempo y la necesidad de verificar periódicamente cómo se identifican y cómo se determina la autenticidad con el fin de adaptar las percepciones y actitudes cambiantes;

- Respetan las diferentes tradiciones locales, prácticas constructivas y enfoques de conservación, teniendo en cuenta la gran variedad de metodologías y técnicas que pueden ser empleadas en conservación;
- Tienen en cuenta y respetan la variedad de especies y calidades de la madera empleadas a lo largo de la historia;
- Reconocen que las construcciones en madera aportan valiosos registros de información cronológica acerca de la totalidad del edificio o estructura;
- Tienen en cuenta el excelente comportamiento de la madera para resistir situaciones de sismo;
- Reconocen la vulnerabilidad de las estructuras construidas total o parcialmente en madera cuando se varían las condiciones de entorno y climáticas, causadas por (entre otros) fluctuaciones en la temperatura y la humedad, luz, ataques de insectos y hongos, el uso y el deterioro, fuego, sismos y otros desastres naturales, así como acciones destructivas de los hombres;
- Reconocen la creciente pérdida de estructuras históricas de madera debido a la vulnerabilidad, mal uso, pérdida de los oficios, del conocimiento del diseño tradicional y las tecnologías de la construcción, y la falta de comprensión de las necesidades espirituales e históricas de las comunidades vivas;
- Reconocen la relevancia de la participación de las comunidades en la protección del patrimonio de madera, su relación con las transformaciones sociales y medioambientales y su rol en el desarrollo sostenible” (ICOMOS, 2017).

“Es indiscutible la importancia del patrimonio cultural dentro de los procesos de globalización, ya que tanto el patrimonio cultural tangible como el intangible, contienen valores intrínsecos propios que refuerzan la identidad de los pueblos” (Hiriart, 2013, pp. 64-87).

De la noción de patrimonio cultural se derivan otros conceptos como patrimonio tangible e intangible, natural, monumento histórico, paisajes culturales, rutas culturales y patrimonio monumental entre otros. (Pérez de Cuellar, 1987; UNESCO, 2001). Esto nos brinda un mejor panorama de cómo podemos abordar y resolver los inconvenientes que se presentan en las restauraciones de estas edificaciones desde el punto de vista de su conservación y protección del patrimonio.

Es responsabilidad de las personas que se relacionan con la conservación del patrimonio estar siempre en un constante aprendizaje de nuevos métodos que pueden sustentar las teorías al respecto o bien que estas sean replanteadas y sustentadas en los nuevos conocimientos que el avance de las distintas disciplinas ofrecen.

Surgiendo así preguntas como; ¿Los análisis de madera a nivel laboratorio pueden ser aplicados *in situ* para el caso de nuestro país?, ¿Es posible la aplicación de métodos no destructivos en la madera estructural que permitan conocer su estado actual y el grado de seguridad que aun ofrecen? y ¿Pueden las técnicas de análisis no destructivas contribuir y mejorar la toma de decisiones previas a una intervención de restauración rehabilitación o de mantenimiento?

Las respuestas a estos cuestionamientos pueden ser diversas y confrontadas entre sí, dependiendo del enfoque sobre el que se apoye la respuesta. Sin embargo, producto del análisis de la bibliografía que sustenta esta investigación, el estudio de la madera estructural se toma como un factor de importancia en el desarrollo de nuevas metodologías instrumentadas, respondiendo positivamente a las tres interrogantes planteadas.

Hiriart, (2022) habla sobre la fragilidad y vulnerabilidad del patrimonio cultural (tangible e intangible) a los peligros antrópicos y naturales que se ve comprometido hoy más que nunca ante las crecientes presiones, amenazas y situaciones emergentes. En este contexto Hiriart, (2022) cita a (KALAM y Fundación EKABA, 2019) explicando que es urgente la implementación de políticas estratégicas y acciones conjuntas entre las instituciones públicas, encargadas de su tutela y salvaguarda, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil para proteger estos testimonios no complementarios de la riqueza cultural de las naciones.

Nuevas tecnologías en materiales tradiciones para la prevención de riesgos son puntos importantes para considerar en los aspectos de la Inspección, la Documentación y de la Investigación. Cualquier intervención deberá ser precedida de un diagnóstico exhaustivo y riguroso. Este debería estar acompañado de una comprensión y análisis de la construcción y el sistema estructural, de su condición y de las causas de cualquier descomposición, daño o fallo estructural, así como de los errores de concepción, dimensionamiento o montaje.

El diagnóstico debe basarse en evidencias documentales, inspección física y análisis y en caso de ser necesario, medidas de las condiciones físicas realizando ensayos no-destructivos (END), y en caso de necesidad ensayos de laboratorio. Ello no excluye realizar intervenciones menores y tomar medidas de emergencia donde éstas sean necesarias (ICOMOS, 2017).

3. Justificación

En la actualidad existen conceptos que deben ser considerados en los trabajos de conservación del patrimonio, desde el punto de vista de los elementos de madera la autenticidad y la comprensión de este concepto juega un papel fundamental en todos los estudios científicos del patrimonio cultural, en los planes de conservación y restauración; así como en los procedimientos de inscripción utilizados por la Convención del Patrimonio Mundial y otros inventarios de patrimonio cultural. La autenticidad, considerada de esta manera, y afirmada en la Carta de Venecia, aparece como el factor de cualificación esencial en lo que concierne a los valores (Documento de Nara, 2019).

“Dependiendo de la naturaleza del patrimonio cultural, de su contexto cultural, y de su evolución a través del tiempo, los juicios de autenticidad pueden vincularse al valor de una gran variedad de fuentes de información. Algunos de los aspectos de las fuentes pueden ser la forma y el diseño, los materiales y la sustancia, el uso y la función, la tradición y las técnicas, la ubicación y el entorno, así como el espíritu y sentimiento. La utilización de estas fuentes brinda la posibilidad de analizar el patrimonio cultural en sus dimensiones específicas en los planos artístico, técnico, histórico y social (Nara, 2019).

Los monumentos históricos y sus intervenciones en México están reguladas con la normativa del INAH como autoridad reguladora federal, promueve y autoriza la participación de las comunidades y organizaciones civiles no gubernamentales para la protección de los monumentos, de manera general y en algunas ocasiones para casos específicos se cuenta también con algunas estatales o municipales, en donde lamentablemente no se contempla a la madera de recuperación.

De acuerdo con Hiriart (2022) en donde cita (DOF, 1972), en México existe un complejo sistema legal para la protección del patrimonio cultural. La Ley Federal de Zonas y Monumentos Arqueológicos, Artísticos e Históricos otorga al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) en las cuales se describen los lineamientos para la conservación, investigación, protección, restauración y recuperación de los monumentos y bienes muebles. En la actualidad, en México no se cuenta con una normativa específica para la madera que es retirada durante los trabajos de rehabilitación, remodelación, reparación y restauración que permita delimitar las estrategias y actuaciones de los métodos empleados en la conservación y reutilización de la madera estructural de recuperación de los sitios y monumentos, que en la mayoría de los casos cuentan con un historial de uso de varias décadas o inclusive de siglos (en el caso de las

construcciones coloniales de México) y que aún pueden ser reubicadas en otro inmueble de características semejantes como elemento estructural.

Es un punto muy importante que, sin embargo, no ha sido desarrollado en muchos países a pesar de que se requiere para ser adaptado y verificado antes de su aplicación a estructuras existentes, ya que estas por lo general se refieren a madera de corta reciente (Cruz, *et. al.*, 2015). En el caso de la madera antigua o de recuperación, la reciente norma europea para la conservación de estructuras de madera históricas (EN 17121, 2019), también prevé el uso de clasificación visual, combinado, si es necesario, con otros elementos no destructivos (Conde, *et. al.*, 2007; Cavalli *et. al.*, 2013; Cavalli *et. al.*, 2016) o técnicas semi-destructivas (Sousa, *et. al.*, 2014). La caracterización mecánica de la madera antigua o de recuperación utilizada en las estructuras de maderas es un elemento fundamental para garantizar la sostenibilidad y seguridad en el mantenimiento y conservación de la obra (Macchioni *et al.*, 2012; Feio *et al.* 2015).

En el caso específico de Italia, se dispone de una norma nacional para la evaluación de estructuras históricas de madera portante (UNI 11119, 2004). Esta norma proporciona procedimientos y requisitos para la visualización y clasificación de la madera estructural de recuperación. También sugiere la posibilidad de utilizar el estándar italiano para la clasificación visual de la madera estructural de reciente corta, (UNI 11035, 2004). Ambos estándares permiten la posibilidad de vincular las evaluaciones en donde se emplea la inspección visual a las propiedades mecánicas de los elementos de madera en los términos como resistencia a la tensión, compresión, ruptura y aplastamiento en sus valores admisibles (UNI 11035-1; 2010; UNI 11035-2, 2010).

Se puede suponer y admitir que no solo las normativas y la falta de ellas juegan un papel relevante en los procesos de conservación y que la causa más importante de decisiones equivocadas en cualquier proceso, dando por supuesta la capacitación del o de los individuos que toman las decisiones, es una falta de información o de métodos adecuados que le lleven a una correcta interpretación de la realidad, o de la toma de datos que constituyen la base sobre la cual se van a producir las decisiones (Rodríguez, 1995).

Al momento de realizarse una intervención en estos sitios la madera puede ser sustituida en su totalidad por otros materiales (lozas de concreto armado), que pueden o no simular el sistema constructivo de un forjado (empleando viguetas de madera, o prefabricados de yeso o tablaroca, etc. dándoles una apariencia de madera mediante pintura, texturizantes, en chapados o cualquier cosa que el restaurador sea capaz de emplear).

En los casos en los que los criterios de las autoridades consideran que si es posible y viable realizar una sustitución de la viguería por madera de resiente corta, el criterio es básicamente de manera general el que todos estos elementos sean sustituidos, debido a que la caracterización de la madera de tipo estructural es un proceso complejo que pocas personas en México realizan, esto complica la toma de decisiones sobre los criterios de clasificación de la madera ya que siempre se debe de considerar el factor de la seguridad y estabilidad de cualquier construcción.

La falta de una metodología fundamentada en criterios científicos tanto de conservación como de rehabilitación y reparación puede provocar un mayor daño al monumento si no se le presta la debida atención por eso es muy importante que se realicen trabajos de investigación enfocados a fortalecer estos aspectos. El que se les brinden herramientas a los profesionales encargados de la conservación para mejorar la manera de diagnosticar y resolver problemas en los elementos estructurales de madera es una necesidad actual en nuestro país. Por lo tanto, la disponibilidad de reglas de calificación nacionales desarrolladas para nuevos elementos de madera proporciona una base fundamental pero que no es suficiente para cubrir las demandas actuales.

En el proceso de intervención la sustitución de la madera genera problemas que no se contemplan en los tiempos de finalización de la obra, ya que estos puntos muy particulares del material salen del contexto de visualización de la gran mayoría de las personas que comienzan a trabajar con la madera de grandes dimensiones, ya que este hecho implica el conseguir una gran cantidad de madera en dimensiones que rara vez se encuentran disponibles en el mercado. El emplear madera en dimensiones poco comerciales provoca que esta no esté en condiciones de ser colocada a tiempo y que esta también presente altos porcentajes de Contenido de Humedad. Al ser madera verde esta sufrirá contracciones que podrían provocar grietas en las azoteas y generar filtraciones que terminarían dañando la estructura interna de la madera, así como también si esta no fue tratada debidamente el surgimiento de agentes biológicos.

Una opción para evitar estas complicaciones es crear una estrategia de intervención que contemple estos factores, así como también un estudio previo de forma instrumentada que contemple las condiciones de los elementos estructurales, esto en el caso de la madera ayudaría también a reducir costos ya que en algunas situaciones es posible reubicar y reutilizar esta madera aun como elemento estructural. Es importante recordar que la autenticidad es esencial para mantener el valor histórico y cultural de los monumentos del patrimonio cultural, pero al mismo tiempo la seguridad estática de la estructura debe estar garantizada. De los beneficios medioambientales que se pueden mencionar respecto al extender la vida útil de las estructuras y

los elementos de madera, o la reutilización de la madera resultante del desmantelamiento (madera recuperada), se puede decir que se traducirán en un mayor almacenamiento de carbono con el tiempo, al conservar mejor nuestros bosques evitando la tala de estos.

En México no existe una normativa que señale como es que pudiera ser posible la reutilización esta madera de recuperación en algún otro inmueble de estas características, o como pudieran ser clasificadas estas madera en base a su resistencia. Sería una gran aportación al medio ambiente que la madera recuperada pudiera ser reubicada y únicamente realizar la sustitución de los elementos cuya estructura ya este comprometida y resulten ser un riesgo a la seguridad del inmueble, siempre cuidando de su autenticidad.

“En la Conservación todos los esfuerzos encaminados a comprender el patrimonio cultural, a conocer su historia y su significado, a garantizar su salvaguarda material y, cuando se requiera, su presentación, restauración y puesta en valor. (Se entiende que el patrimonio cultural incluye los monumentos, los grupos de edificios y sitios con valor cultural, como se definen en el artículo 1 de la Convención sobre el Patrimonio Mundial)” (Documento de Nara, 2019).

Los Métodos no Destructivos son una opción viable y segura para poder lograr este objetivo, trabajos como este son de suma importancia en el país para apoyar a la conservación de nuestro patrimonio sentando las bases para el desarrollo de metodologías y normativas nuevas que fortalezcan las existentes enfocadas a la madera de recuperación y a otros elementos no solo estructurales.

“Los materiales y tecnologías actuales deben ser escogidos y utilizados con la mayor precaución y sólo en los casos en que la durabilidad y el comportamiento estructural de los materiales y las técnicas de construcción hayan sido satisfactoriamente probados durante un período de tiempo suficientemente largo” (ICOMOS, 2017).

Actualmente se han estado incluyendo, en todas las actuaciones internacionales de la Conservación del Patrimonio (ICOMOS), también los paisajes característicos de las diferentes regiones de los países (los bosques también forman parte de este patrimonio), tal es el caso del paisaje de las zonas de cultivo del Agave Azul (cactácea de la cual se obtiene el Tequila) del Estado de Jalisco en México. Estas acciones pretenden apoyar a la conservación, tanto del Patrimonio Cultural y Medioambiental conservando el Patrimonio del paisaje cuidando del medioambiente.

“Debido a que las estructuras de madera pueden estar en un estado vulnerable, pero todavía son parte de un patrimonio vivo y que aún aporta a la sociedad, la disponibilidad

de maderas adecuadas es esencial para su conservación. Por lo tanto, debe reconocerse el papel crucial que desempeñan las reservas forestales en los ciclos autosostenibles de mantenimiento y reparación de estas estructuras de madera” (ICOMOS, 2017).

Trabajos de este tipo no solo impactan en los sectores involucrados con la restauración, rehabilitación y recuperación del patrimonio construido estando presentes también factores como el manejo territorial y ambiental (entorno natural como nuestros bosques), sino que también involucra otros aspectos de la sociedad que pareciera no tener una relación pero que, si existe e impacta a la sociedad, como el cuidado del medioambiente y la conservación de los bosques .

De acuerdo con Hiriart (2022) que cita a (Amézcuca y Sánchez, 2015, p. 15), A pesar de la diversidad y riqueza biocultural en las últimas tres décadas, la región P'urepecha ha resentido la pérdida permanente de sus recursos naturales y fauna endémica, la tala desmedida de sus bosques, el deterioro y pérdida de su patrimonio y, desde hace más de dieciocho años, la creciente inseguridad por la presencia del narcotráfico y el crimen organizado.

3.1 Contribución del proyecto

La ciudad de Morelia en su centro histórico resulta importante para varios sectores de la sociedad relacionados con el tema de la conservación, así como el sector gubernamental, las asociaciones civiles, grupos de productores de recursos maderables, empresarios de sectores como el turístico hotelero y el comercio derivado de estas actividades, grupos ciudadanos, etc. Estos sectores requieren de diferentes apoyos como el técnico-científico para abordar problemas generadas y relacionadas con la conservación y gestión del patrimonio cultural con el cual sus actividades están vinculadas.

“Deben fomentarse los programas de investigación (en particular a nivel regional) para identificar las características distintivas y los aspectos sociales y antropológicos de los edificios, los sitios y el patrimonio construidos en madera (ICOMOS, 2017).

Este tipo de propuestas de investigación deben de ser un trabajo interdisciplinario de forma secuencial evolutiva debido a la complejidad de los sectores involucrados en la primera fase de mi investigación (investigación de maestría) se logró medir las propiedades físico-mecánicas de la madera a nivel laboratorio (logrando aplicar una metodología congruente con las necesidades y limitaciones presentes en el país), en la segunda fase fue posible la caracterización de esta madera in situ (obteniendo buenos resultados en ambas fases de la investigación) y comparándos con pruebas destructivas (para tener una mayor certeza de que el método y las técnicas aplicadas son representativas).

A lo largo de la realización de esta investigación fue notoria la falta de instrumentos que apoyen al proceso de toma de decisiones en las intervenciones de restauración en los sitios y monumentos de carácter patrimonial, así como también la falta de conciencia y responsabilidad ambiental del uso de la madera como un material en los trabajos de restauración. El criterio de forma general que se ha aplicado en los trabajos de restauración y rehabilitación de la arquitectura patrimonial es el de sustituir en su totalidad las vigas de madera de los edificios. Esta sustitución obedece a que a simple vista las vigas de madera ya no son capaces de ser reutilizadas como elementos estructurales, en esta investigación y en otras anteriores se pudo comprobar que existen en estos grupos algunas piezas que aún pueden ser reutilizadas ya que sus valores de resistencia lo permiten.

Si pensamos que en una habitación de cualquiera de las edificaciones de este tipo el promedio de vigas empleadas es de más menos 50 piezas y que las dimensiones de estas en promedio son mayores a los 15 cm como mínimo y sus longitudes pueden llegar a sobrepasar los 6 metros, cada viga equivaldría a un árbol maduro (el área que estos árboles ocupan en un bosque es un espacio considerable ecológicamente hablando). Para la obtención del material en este tipo de intervenciones se requiere de una gran cantidad de árboles con diámetros mayores a 30 cm. debido a los procesos de aserrado que se emplean (un árbol por viga), el impacto que la obtención de la madera genera en el medioambiente y en el paisaje es algo importante de contemplar. A este problema se suma también la falta de normativas que contemplen la reutilización de la madera de recuperación.

Al no existir una normativa en México que señale como es que pudiera ser reutilizada esta Madera de Recuperación, tomando en cuenta sus características para ser clasificadas en base a su resistencia sin que estos elementos sufran más daños. En el proceso de intervención la sustitución de la madera genera problemas que no se contemplan en los tiempos de finalización de la obra, ya que existen puntos muy particulares a tomar en cuenta con la madera como material que salen del contexto de visualización de la gran mayoría de las personas que recién la emplean como material de construcción debido a las grandes dimensiones que se manejan en un proceso de restauración. Este hecho implica el conseguir una gran cantidad de madera en dimensiones que rara vez se encuentran disponibles en el mercado.

El emplear madera en dimensiones poco comerciales provoca que esta no esté en condiciones de ser colocada a tiempo y que esta también presente altos porcentajes de Contenido de Humedad. Al ser madera verde esta sufrirá contracciones que podrían provocar grietas en las azoteas y generar filtraciones que terminarían dañando la estructura interna de la madera, así

como también si esta no fue tratada debidamente el surgimiento de agentes biológicos que comenzaran a degradarla. Es importante crear un espacio de investigación transdisciplinario, de entrenamiento y capacitación para los profesionistas involucrados como para los técnicos y los involucrados en la obtención de la madera mediante la atención de los diferentes problemas en cada uno de sus contextos específicos de implicación.

En el contexto de nuestro país en donde no contamos con manuales de clasificación de las propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de gran escuadría que contemplen las zonas de crecimiento de los árboles y que identifique estas propiedades también por especie, con el fin de apoyar a los estructuristas en su trabajo. Es fácil darse cuenta de que para que pudiéramos igualar este tipo de investigaciones con los criterios con los que están realizadas las normativas europeas, deberíamos de sacrificar grandes cantidades de madera en distintas dimensiones debido a los requerimientos de estas normativas para que estas puedan tener un impacto importante y ser válidas para la clasificación de especies mexicanas.

Esta labor se complica cuando pensamos que en México se cuenta con poco más de 91 especies conocidas (sin contar las especies latifoliadas) de las 575 coníferas que existen en el mundo y pertenecen a cinco familias: Cipreses (Cupressaceae 32 especies), Pinos, Abetos y Hayarines (Pinaceae 54 especies), Podocarpos (Podocarpaceae 3 especies), Ahuehuete (Taxodiaceae 1 especie) y el Tejo (Taxaceae 1 especie), (Biodiversidad, 2017). Un trabajo tan extenso implicaría que fueran analizadas en una primera etapa las principales especies de tipo comercial en el país identificando su especie, sus zonas de crecimiento etc. Se tendrían que sacrificar una gran cantidad de especímenes (estas pruebas se tendrían que aplicar a las dimensiones específicas diversas estándar en el mercado, 35 piezas como mínimo por especie y por medidas) para la realización de las diferentes pruebas físico- mecánicas ensayadas en vigas de tamaño real como lo indican las normas europeas.

La creación de una normativa mexicana para madera estructural que pueda ser aplicada a los trabajos de conservación del patrimonio construido, se complica más cuando se observa que la mayoría de las normativas está enfocada a madera sana o de reciente corta y la madera antigua, envejecida, deteriorada o en uso estructural (periodos mayores a los 100 años), no es considerada debido a que esta no tiene la misma frecuencia de uso que la anterior (solo en casos muy específicos es que es analizada). En esta investigación se desarrolló y se planteó la opción de emplear Métodos No Destructivos como un apoyo más para la caracterización y clasificación de las propiedades físico-mecánicas de la madera de recuperación con el fin de reutilizar los elementos estructurales que aun conserven las condiciones óptimas y la madera de reciente corta

que sustituirá a las que ya no es posible reutilizar. Así como también a la formación y capacitación de capital humano relacionado a las distintas fases y actividades que conforman el tema de la convención del patrimonio mundial cultural (madera recuperada) y natural (conservación de los bosques en el mejor aprovechamiento de la madera), para dar atención a demandas de grupos y sectores de la sociedad relacionados con la conservación, con miras a contribuir a dar un servicio organizado y científicamente basado en una metodología adecuada para estos casos particulares y promover soporte técnico y científico a las demandas específicas de estos grupos o sectores de la sociedad que se verán reflejados también de forma positiva en el índole ambiental-territorial.

Los Métodos No Destructivos aplicados a la madera también pueden ayudar a la obtención de valores como el Módulo de Young (parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza) sin tener que hacer uso de técnicas destructivas como las que emplean las normas europeas para ensayos de flexión (estas han eliminado los ensayos en probetas de sección pequeñas y prefieren sean ensayados los elementos estructurales en tamaño real esto debido a que los resultados resultan complejos de analizar si no se tienen bases suficientes sobre el conocimiento de la madera). De esta forma es posible clasificar la madera según su resistencia, tanto la madera de recuperación (caracterización *in situ*), como la madera de resiente corta (caracterización de la madera en pie) antes de ser cortada es posible hacer una caracterización de esta. Es posible ayudar con este tipo de técnicas a las plantaciones de árboles para determinar las propiedades mecánicas de las maderas que cultivan. (Carrillo, Sotomayor y Raya, 2019; Carrillo y Carreón, 2020; Carrillo, Carreón y Raya, 2021).

“Las instituciones encargadas de la conservación de los monumentos y lugares deben fomentar la protección de las reservas forestales originales y establecer almacenes de madera curada, apropiada para la conservación y reparación del patrimonio construido en madera. Esta política debe prever la necesidad de grandes elementos de madera convenientemente secada para futuras reparaciones. Sin embargo, tales políticas no deben fomentar la sustitución extensiva de elementos auténticos de estructuras históricas, sino más bien constituir una reserva para reparaciones y reemplazos menores” (Documento de Nara, 2019).

Hay mucho por hacer en este campo en relación con la madera tanto en los bosques como en las edificaciones, algunos países han logrado conjuntar la conservación de sus territorios, el generar economías sustentables, enlazar a la cultura y la conservación del patrimonio mediante

la unión de distintos factores de la sociedad a través de la ciencia. Sentar las bases para comenzar con nuestros propios manuales de resistencia y clasificación de la madera como material de construcción es posible mediante la implementación de las técnicas de métodos no destructivos.

Conservar nuestros paisajes naturales es importante, el monitoreo y la reubicación del material (madera recuperada), previo a un análisis instrumentado correcto apoya al medio ambiente y a la industria maderera que puede hacer uso de estas técnicas para la mejorar los servicios que esta ofrece. La conservación del medioambiente se verá beneficiado también si consideramos que cada viga de madera que sea reubicada es un árbol menos que tendremos que talar en el bosque, evitando con esto la liberación de carbono (proceso que se genera cuando se realiza el desmonte), al retirar la madera también se retiran los elementos como ramas hojas semillas de las diferentes especies de plantas que conforman el ecosistema del bosque que contribuyen a la captura de carbono en el ambiente.

4. Hipótesis

A partir de la utilización de los métodos no destructivos de ultrasonido en vigería en uso (*in situ* con características antiguas), vigería de reciente corta, y en probetas provenientes de la vigería analizada *in situ* (medición en laboratorio) es posible que permitan obtener parámetros como, la Velocidad de onda Longitudinal y Transversal, el Módulo de Young y el Módulo de Corte y la Birrefringencia que indican la resistencia mecánica de ambos grupos de madera.

Apoyándose en técnicas destructivas poco invasivas como son el análisis anatómico (identificación de características propias de la especie y la degradación de sus elementos constituyentes), la caracterización básica química (determinación de pH, holocelulosa, lignina, extraíbles y las sustancias inorgánicas presentes en la madera de recuperación y el efecto de estos elementos en sus propiedades físico-mecánicas) y ensayos físico-mecánicos (cuando se cuente con el material suficiente para la realización de probetas) que indican la resistencia mecánica para su uso en madera estructural. Estos parámetros contribuirán para identificar los estados de deterioro y pudrición en elementos de madera (provocados por la edad, su tiempo de uso y los factores ambientales y biológicos) y establecer criterios de sustitución refuerzo y reutilización de la madera de recuperación en los elementos estructurales de madera en edificios históricos.

5. Objetivos Generales

- A partir del análisis de casos de estudio en el centro histórico de Morelia; desarrollar una metodología básica de actuación aplicable al diagnóstico del estado de edificaciones que cuente con una estructura de madera, como paso previo al desarrollo de cualquier intervención.

- Desarrollar una metodología básica de actuación aplicable al diagnóstico del estado de edificaciones que cuente con una estructura de madera, como paso previo al desarrollo de cualquier intervención.
- Aplicar algunos de los métodos de ensayo no destructivo como medida predictora para la inspección y evaluación, *in situ*, del estado de elementos estructurales de madera, basándonos en las medidas de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas, obtención de la densidad y detectora de daños bióticos, que con carácter complementario puedan aplicarse directamente como alternativa de diagnóstico.
- Emplear equipos portátiles, de fácil manejo y aptos para ser utilizados en piezas estructurales de madera puestas en obra, que mejoren los diagnósticos de las edificaciones de carácter histórico, enfocadas especialmente a la restauración y rehabilitación con el fin de salvaguardar el patrimonio conservando los sistemas tradicionales y evitando la sustitución innecesaria de elementos originales de las estructuras históricas de madera.

5.1 Objetivos particulares

1. Aplicar los métodos tradicionales de diagnóstico, como la inspección visual la cual abarca puntos como el monitoreo de condiciones como la humedad, ataques biológicos y daños estructurales visibles (alabeos, rajaduras torsión etc.).
2. Estudiar el comportamiento de la madera, estructural en uso (antigua) y la de sustitución (nueva), frente a la transmisión de ondas ultrasónicas.
3. La relación entre las velocidades ultrasónicas longitudinales y transversales según las direcciones principales de la madera y la influencia de la humedad, temperatura y posibles defectos de la madera en las velocidades de transmisión.
4. Obtener una estimación del valor de las propiedades elásticas de la madera como el módulo de Young y del módulo de corte de la madera estudiada a partir de las mediciones de ultrasonidos.
5. Efectuar muestreos (cuando sea posible) de los elementos estructurales para la identificación de especie y calcular la densidad de los elementos estructurales.

5.1.1 Objetivos para análisis químico

1. Determinar la composición química de las cabezas de madera de pino proveniente de vigería antigua, tanto en la zona de albura como de duramen, como parte complementaria de la investigación de tesis doctoral.

2. Determinar los componentes químicos estructurales y accesorios a través de los análisis de Contenido de humedad, pH, Contenido de cenizas, Extraíbles totales, solubles en solventes orgánicos y en agua caliente, Contenido de lignina, Contenido de holocelulosa, Contenido de α -celulosa.
3. Realizar el análisis de varianza estadístico de los componentes químicos entre los ejemplares y entre el tipo de material albura y duramen (sano y deteriorado).

6. Marco Teórico Conceptual

Los conceptos y métodos que se plantean a continuación son una síntesis de un largo debate y análisis de conceptos que dan como resultado un marco conceptual de temas todos importantes para la comprensión y aplicación de la metodología de esta investigación.

La Xilología o Tecnología de Maderas como ciencia es la encargada de estudiar la madera tanto en sus caracteres estructurales como estéticas, físico-mecánicas, químicas y sus anomalías. (Rodríguez,1977). De forma simple y general se puede decir que la madera está formada principalmente por la unión de estas células; su tamaño, forma y distribución junto con otros elementos anatómicos, como los radios leñosos, la presencia de canales resiníferos o de vasos, etc. son los que dan lugar o definen las diferentes especies de madera. Esta estructura tubular es la que confiere las propiedades que tiene la madera, que depende en gran medida de las propiedades de la pared célula (Fernández, 1991).

Se dividen las maderas bajo dos denominaciones generales, coníferas y latifoliadas:

- Coníferas: especies pertenecientes al orden coniferales (Abetos, Piceas, Alerces, Cedros, Pinos, etc.), que comprende la mayor parte de las incluidas en la división de las gimnospermas.
- Latifoliadas: especies leñosas pertenecientes a la división de las angiospermas dicotiledóneas (Roble, Haya, Olmo, Encina, etc.). A veces se subdividen en latifoliadas boreales, australes y tropicales (Martines, 1948).

Se llama madera al conjunto de tejidos que forman el tronco, las raíces y las ramas, de los vegetales leñosos, excluida la corteza. La madera es un material orgánico y natural, compuesto fundamentalmente por celulosa (40-60%), hemicelulosa (5-25%) y lignina (20-40%). La madera no es un material homogéneo, sino que está formado por un conjunto de células especializadas en tejidos que llevan a cabo las tres funciones fundamentales del vegetal, la conducción de la savia, la transformación y almacenamiento de los productos vitales y el sostén del vegetal (Rodríguez,1977).

6.1. La Madera de pinos

Los pinos (División: Gimnosperma) son un grupo de plantas vasculares con semilla de origen muy diverso. Fueron abundantes en otras épocas geológicas y actualmente están representadas solo por grupos reducidos. su característica común es la presencia de “semillas desnudas”; estas plantas presentan óvulos expuestos en hojas -modificadas (megasporófilas), que protegen a la megaspora originada a partir del gameto femenino, así mismo presentan microesporangios masculinos que se producen en hojas modificadas (microsesporófilas) (Martines, 1948).

Rodríguez (1998); en el grupo se encuentran los Cipreses, Cedros, Sabinos, Pinos, Piñoneros, Piñones, Abetos, Oyameles, Pinabetes, y el Ahuehuete. También se les ha denominado coníferas debido a que sus semillas se producen en conos. Él nos recuerda que son plantas leñosas que aparecieron sobre la tierra hace unos 300 millones de años, en el periodo Carbonífero y se fueron formando a lo largo del Mesozoico (250 a 65 millones de años). Se considera que en la era Terciaria (hace 65 millones de años) ya existían las especies actuales (Instituto de Investigaciones, 1995).

Aunque el número de coníferas es muy bajo comparándolo con l de las plantas con flor (División: Angiospermas), su valor económico las convierte en un grupo muy conocido e importante. México cuenta con poco más de 91 especies conocidas de las 575 coníferas que existen en el mundo y pertenecen a cinco familias: Cipreses (*Cupressaceae* 32 especies), Pinos, Abetos y Hayarines (*Pinaceae* 54 especies), Podocarpos (*Podocarpaceae* 3 especies), Ahuehuete (*Taxodiaceae* 1 especie) y el Tejo (*Taxaceae* 1 especie), ver figura 6.1, (Biodiversidad, 2017).

Algunas especies tienen una extensa y variable distribución geográfica, comúnmente crecen juntas de tres a cinco especies de pinos en un mismo bosque; la altitud juega un papel determinante en la composición y distribución de las especies de pino. Así mismo, son invasores agresivos de suelos minerales expuestos. Estos suelos se encuentran en áreas montañosas de origen volcánico (Martines, 1948).



Figura 6.1. Ejemplos de las características de las coníferas, (a) conífera, (b) rama con hojas en forma de aguja y cono, (c) plántulas. (Biodiversidad, 2017).

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

6.2. Propiedades Físicas de la Madera

Cuando se habla de las propiedades físicas se hace referencia a estas tres direcciones, y cuando se habla de las propiedades mecánicas sólo se habla de dos direcciones, la dirección paralela a las fibras (que coincide con la longitudinal) y la dirección perpendicular a las fibras (que engloba a la tangencial y radial, cuyas propiedades mecánicas suelen tener valores similares) (Agriculture, 2010).

Las propiedades físicas de la madera son aquellas que determinan su comportamiento frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química. Estas propiedades engloban a las que determinan su comportamiento: Vibraciones acústicas (conductividad del sonido, transmisión del sonido, resonancia). Calor (conductividad térmica, gradiente de temperatura, dilatación térmica). La gravedad (peso específico, densidad, porosidad). La iluminación (color, brillo y textura). La posibilidad de emitir partículas gaseosas (olor). Con el agua (contenido de humedad, torsión, hinchamiento, merma), (Hoadley, 2000).

6.2.1. Material Anisotrópico, Ortotrópico

La madera no es un material de estructura homogénea y uniforme. Se encuentra formada por un conjunto de células alargadas de diferente longitud que cumplen funciones tales como la conducción de la savia (alimento del árbol), transformación y almacenamiento de sustancias nutrientes o bien la sustentación física (varían sus propiedades como la elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, dependiendo de la dirección en que son examinadas presentan diferentes características) (Hoadley, 2000).

La madera, está formada por diferentes tejidos que realizan diferentes funciones y que originan que su estructura no sea homogénea. Esta heterogeneidad se refleja en sus propiedades físicas y mecánicas, y es la causa de algunos de sus defectos y también de sus ventajas. Dicha heterogeneidad da lugar a lo que se conoce con el nombre de anisotropía, que nos brinda el entendimiento del comportamiento de sus propiedades físicas y mecánicas según la dirección que se considere (COFAN, 1999).

Un material es ortotrópico cuando sus propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares entre sí. La madera es en ejemplo de material ortotrópico, (tiene dos o tres ejes ortogonales entre sí, de doble simetría rotacional, sus propiedades mecánicas son, diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes, sus propiedades dependen de la dirección en que son medidas) (Kollman, 1999).

6.2.2. Higroscopicidad y Contenido de Humedad

La madera es un material higroscópico que tiende a absorber o perder agua según las condiciones del ambiente (humedad relativa y temperatura del aire). De esta forma a cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado humedad de equilibrio higroscópico (Fernández, 1991). La higroscopicidad de la madera se mide como la variación de la densidad de esta cuando su contenido de humedad varía en un 1%. La madera deberá tener la humedad correspondiente a la humedad de equilibrio higroscópico (reduciendo los movimientos ocasionarse por la variación de su grado de humedad), (Kollmann, 1999).

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

$$Ch = (Ph - P0) \times 100 / P0 \quad \text{Ecuación 1. Contenido de Humedad.}$$

Siendo: Ph = peso húmedo de la probeta. P0 = peso anhidro de la probeta, (obtenido por desecación en estufa a una temperatura de 103 ± 2 °C.)

La variación del contenido de humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones. Debido a su anisotropía, las variaciones dimensionales no serán las mismas en las direcciones axial, radial y tangencial (Kollmann, 1999).

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

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

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

6.2.3. Densidad y Dureza

La densidad de la madera se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad, generalmente el 12 %. Según su densidad se pueden clasificar en: muy ligera, ligera, semipesada, pesada, muy pesada. La densidad de las maderas es muy variable, de forma particular las coníferas más utilizadas en la construcción tienen una densidad comprendida entre 400 y 550 kg/m³ (Fernández, 1991).

$$P = m/v \quad \text{Ecuación 4. Obtención de densidad}$$

La dureza se define como la resistencia que opone la madera a la penetración de cuerpos extraños como ciertas herramientas, clavos, tornillos, etc. Las maderas se clasifican como: blandas, semiduras y duras. La dureza está relacionada con la densidad y tiene una marcada importancia en su relación con la dificultad de su trabajo ya sea realizado manual o mecánicamente. (Kollmann, 1999).

6.2.4. Propiedades Acústicas y Transmisión del sonido

Las propiedades acústicas de la madera permiten, además de la fabricación de elementos materiales, su utilización en la construcción si se conoce su comportamiento y sobre todo como diseñar e instalar los elementos de madera. Los materiales absorbentes de sonido pueden ser de dos tipos: porosos y paneles resonantes. Los paneles de madera maciza o los tableros derivados a la madera adheridos a superficies rígidas son pobres absorbentes del sonido (absorben entre el 5 - 10% y reflejan más del 90%); dejando la superficie de la madera en forma rugosa se aumenta muy ligeramente la absorción, (Kollmann, 1999).

6.3. Definición de Planos o Secciones

Con el fin de ser capaz de mirar los diferentes aspectos de la madera es importante comprender primero los distintos planos que se pueden cortar para la observación. El corte más común es la sección o corte transversal. Un corte radial es un corte vertical y cruza por el centro del árbol, similar a como se hacen pedazos de leña. El tercer tipo es el corte tangencial, que es perpendicular al corte radial (Fernández, 1991).

Si el plano es normal al eje longitudinal del tronco o rama de donde se extrajeron las piezas, se está frente un corte transversal y por consiguiente la cara transversal. Si al mismo es paralelo al eje longitudinal, se obtienen los cortes longitudinales tangencial o radial. El corte longitudinal tangencial es el que se realiza tangente a los anillos de crecimiento o bien perpendicular a los radios.

Si el corte pasa por la médula, es paralelo a los radios, será visible la cara longitudinal radial. En algunas piezas se observará que no se puede definir sobre toda una cara, en toda su extensión, un corte longitudinal tangencial absoluto. No se verá sólo una cara tangencial sino también una radial. Estos son los cortes longitudinales intermedios y por ende las caras longitudinales intermedias. En los cortes oblicuos este fenómeno es mucho mayor (ver figura 6.2), (Agriculture, 2010).

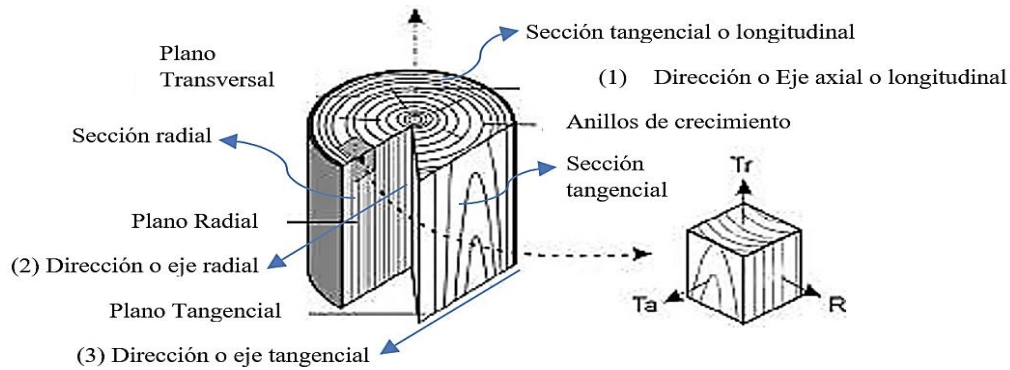


Figura 6.2. Dirección o eje longitudinal (1), eje radial (2) y eje tangencial (3), (Javiersv, 2013).

Las propiedades mecánicas de la madera en un punto se describen en las direcciones longitudinal, radial y tangencial. El eje longitudinal (1) es paralelo a la dirección del grano (fibra), el eje radial (2) sigue la dirección de los anillos de crecimiento y el eje tangencial (3) es tangente a los anillos de crecimiento (ver figura 2) (Agriculture, 2010).

En forma previa a cualquier estudio se debe tener bien definido qué cara o superficie se está observando. La madera es un Material Heterogéneo formado por elementos de distinta clase o naturaleza. Es necesario definir cuál es el plano de corte o sección de la muestra que se determinará. En el análisis anatómico es importante el considera estas direcciones como Cara transversal y Caras longitudinales (Longitudinal tangencial y Longitudinal radial), debido a su heterogeneidad (ver figura 6.3).

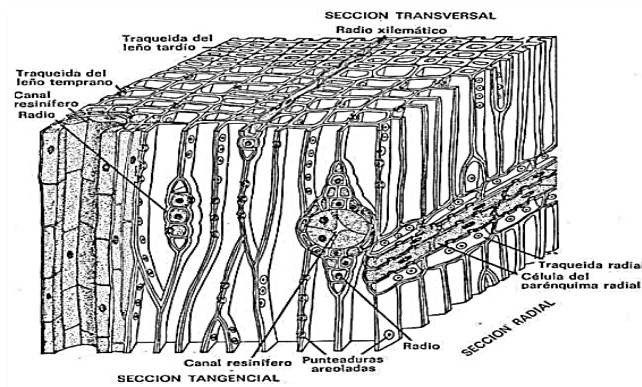


Figura 6.3. Estructura microscópica de coníferas. (madera, 2011).

6.4. Características Anatómicas de la madera

En el estudio de la madera como material, se distinguen tres niveles dentro de los que se explican todas las características de su comportamiento físico-mecánico: la estructura de la pared celular (estructura submicroscópica), la agregación de células para formar madera limpia (estructura microscópica), y la consideración de la madera comercial con defectos (estructura macroscópica), (Agriculture, 2010).

La madera posee tres tipos de tejidos: tejido vascular, tejido parenquimático y tejido fibroso. Se llaman elementos prosenquimáticos todas aquellas células alargadas y de paredes engrosadas, principalmente relacionadas con la conducción y resistencia mecánica; en cambio, se llaman elementos parenquimáticos a aquellas células cortas y de paredes relativamente delgadas que tienen la función del almacenamiento y distribución de las sustancias de reserva (Kollmann, 1999).

6.4.1. Estructura Macroscópica

La estructura macroscópica es visible a simple vista o con lupa de 10 aumentos. Para estudiar la estructura macroscópica de la madera se establecen tres planos o secciones. Se dividen las maderas bajo dos denominaciones generales, coníferas y latifoliadas. Coníferas: especies pertenecientes al orden coniferales, que comprende la mayor parte de las incluidas en la división de las gimnospermas (Esteban, 1988). La estructura macroscópica es la que se observa a ojo desnudo o con diez aumentos. Para su estudio y debido a su heterogeneidad se establecen tres planos o secciones, ver figura 6.4.

Transversal, perpendicular al eje de la rama o tronco

Radial, que pasa por el eje y un radio de la rama o tronco

Tangencial, paralela a un plano tangente al tronco, o al anillo de crecimiento.

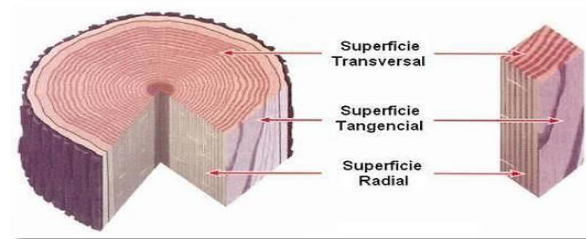


Figura 6.4. Secciones o planos de la madera (Maderas, 2014).

6.4.1.1. Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento pueden clasificarse en: anuales, característicos de las plantas que crecen en la zona boreal y estacionales, característicos de las plantas que crecen en la zona tropical con estaciones climáticas marcadas (Martines, 1948).

Dentro de cada anillo de crecimiento se distingue, más o menos fácilmente: la madera formada en primavera, la madera formada en invierno. Los radios leñosos están constituidos por células dispuestas en dirección radial, perpendicular al eje del árbol, y realizan una función de trabazón de las fibras longitudinales. Tienen importancia en las propiedades de la madera, como elemento de identificación y como responsables, en parte, de las propiedades de contracción de la madera, ver figura 6.5 (Esteban, 1988).

Lo importante es destacar que genéricamente cuando la diferencia es notable, dentro de cada anillo se puede describir la madera temprana y la madera tardía. La madera temprana o de

primavera es menos densa dado que predominan células de mayor diámetro, con paredes más delgadas; en la madera tardía o de verano las células son de menor diámetro y de paredes más gruesas. Entre la madera tardía y la madera temprana la diferencia es abrupta, con un contraste marcado (Vázquez, 2015).



Figura 6.5. Anillos de crecimiento (forestales, 2010).

Se denomina madera juvenil a la que se produce en primeros anillos de crecimiento, normalmente la comprendida entre el quinto y vigésimo año. Esta madera tiene propiedades diferentes a la madera restante del tronco (madera madura) y presenta menor resistencia y rigidez y mayor inchamiento y merma en la dirección longitudinal que la madera normal (Fernández, 1991).

6.4.2 Estructura Submicroscópica

La estructura submicroscópica, está formada por las paredes de la célula. Desde el punto de vista resistente, la constitución de las fibras de madera resulta una concepción realmente eficaz. La fibra tiene una sección hueca, lo que permite además de la conducción de la sustancia, la disminución del peso con una alta eficacia. La capa dominante de la pared secundaria, S2, tiene una capacidad adecuada para resistir fuerzas de tracción. Si el esfuerzo es de compresión, las microfibrillas de la capa S2, trabajan como columnas comprimidas que en este caso son ayudadas por las capas S1 y S3 que actúan como un soporte y evitan el pandeo de estas, (Ver figura 6.6) (Agriculture, 2010).

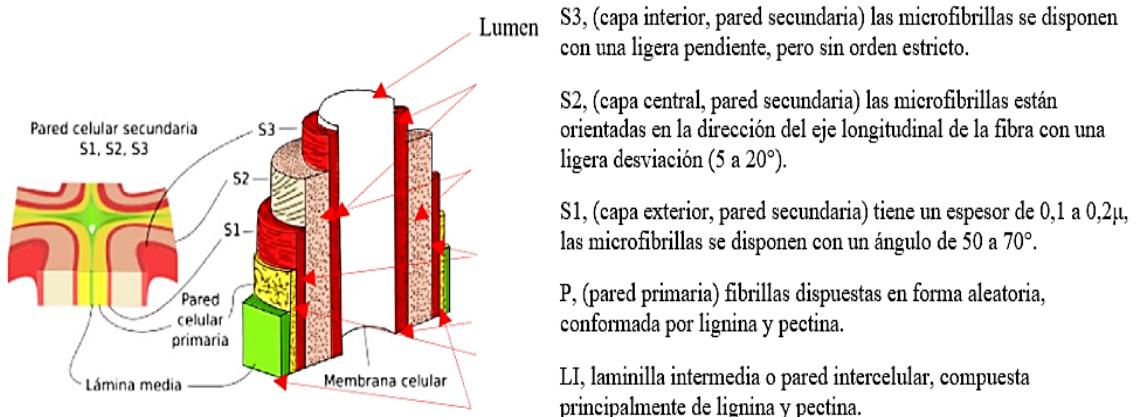


Figura 6.6. Capas que conforman las paredes celulares en la madera (Agriculture, 2010).

6.4.3 Estructura Microscópica

Maderas de coníferas. Las coníferas muestran una estructura relativamente sencilla en la que el 90 a 95% son células denominadas traqueidas. Estas, tienen forma alargada con una longitud de 2 a 5mm y un diámetro de 10 a 15 μm con los extremos cerrados en forma afilada o plana. Estas fibras crecen en sucesivas capas anulares, y tienen su eje longitudinal paralelo al eje del tronco del árbol. El almacenamiento y transporte de las sustancias se realiza a través de las células de parénquima, que en las coníferas están dispuestas principalmente de forma radial (radios leñosos) (Hoadley, 2000).

6.4.3.1 Tejido Parenquimático, Tejido Vascular y Tejido Fibroso

Esta heterogeneidad de la madera se refleja en sus propiedades físicas y mecánicas, y da lugar a lo que se conoce con el nombre de anisotropía de la madera, es decir el comportamiento desigual de la madera frente a una propiedad física según la dirección que se considere (Hoadley, 2000).

Las puntuaciones, son depresiones o cavidades en la pared celular, donde la pared primaria no está cubierta por la pared secundaria y sirven como pasaje o comunicación entre células vecinas. Hay distintos tipos: simples, areoladas, semiareoladas. Las simples son comunes en células parenquimáticas. En los vasos aparecen puntuaciones simples y areoladas, pero éstas sin torus y en las traqueidas, siempre son areoladas y con torus (Moreno, 2010).

Son de suma importancia en la identificación de maderas a nivel microscópico, en donde reviste gran interés el análisis de los campos de cruzamiento, es decir, las zonas de contacto entre los radios leñosos y los otros elementos del leño. Es particularmente importante para identificar coníferas (Barañaño, 2008).

Los canales resiníferos, son espacios alargados formados por la separación de células, por la disolución de ellas o por la combinación de ambos procesos. En general se relacionan con la secreción. El canal, típico de gimnospermas, está tapizado por células epiteliales secretoras de resina y por ende contiene resina en su interior. Entre las coníferas sólo poseen canales resiníferos en la madera de los géneros *Pinus*, *Picea*, *Pseudotsuga* y *Larix*. El número de células epiteliales es característico en cada taxón. *Pinus*: cuatro células; *Pseudotsuga*: 6 células; *Picea*: de 7 a 9; *Lárix*: 12 o más. Se clasifican por esto en epitelios delgados (*Pinus*) o gruesos (Moreno, 2010).

6.5. Los Defectos Naturales en la Madera Aserrada

Conviene aclarar que la mayoría de los investigadores han clasificado los defectos en las siguientes clases: Defectos naturales u originados por la constitución anatómica de la especie, Defectos originados por ataques biológicos como hongos o insectos y Defectos originados durante el secado.

Dada la magnitud del tema, en este trabajo sólo se describirán los diversos tipos de defectos que se dan en la madera cuando se originan por la constitución anatómica de cada especie y la forma de medirlos (Ceron, 1999; Echenique, 1993; Estructural, 1984).

Defectos naturales: Es común que presente diversas características asociadas al proceso de crecimiento de los árboles. A estas características les llamamos “defectos”, aunque en realidad se trata de características orgánicas naturales. Tienen su origen cuando el árbol está en pleno proceso de desarrollo. Los principales defectos naturales que se presentan en la madera son:

- Médula incluida y bandas anchas de parénquima. Cuando esta parte del tronco queda incluida dentro de una pieza de madera aserrada es considerada como un defecto por representar una zona débil y fácilmente degradable. Está conformada por los anillos de crecimiento inicial del tronco constituidos por células de parénquima o células muertas. Para reconocerla se observan las cabezas de la pieza de madera y se ubica la zona concéntrica de los anillos de crecimiento, para luego determinar su prolongación a lo largo de la pieza (Ceron, 1999).
- Grano (inclinado y entrecruzado), hilo o fibra. La orientación de las fibras de la madera es una característica que comúnmente recibe el nombre de hilo o grano. Esta disposición se debe a la propia distribución de las fibras durante el crecimiento del árbol o a la forma en que las trozas han sido aserradas para la obtención de los diversos productos de madera.
- Grano entrecruzado, es la disposición del grano debida a un crecimiento de las fibras en forma de espiral con respecto al eje del árbol, alternándose la dirección de la espiral en capas de diverso espesor, de tal manera que una capa tendrá orientación hacia la derecha, la siguiente hacia la izquierda, y así sucesivamente. En las piezas de corte tangencial el grano entrecruzado presenta el mismo aspecto que una especie de grano recto, se debe considerar la combinación de la desviación del grano en los dos planos, que se determina tomando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones en cada plano (Hoadley, 2000).

La desviación del grano afecta considerablemente el comportamiento mecánico de las piezas de madera debido a su naturaleza anisótropa. Por ejemplo, una desviación de 1/20 puede reducir el módulo de ruptura en 7% y el módulo de elasticidad en un 4%. Si la desviación es de 1/5, las reducciones respectivas son del 45% y el 33% (Echenique, 1993).

6.5.3. Nudos

Los nudos son quizás el defecto natural más común en la madera. A medida que un árbol se desarrolla va envolviendo el arranque de las ramas. Los nudos son las porciones de las ramas que

quedan rodeadas por la madera del tronco (Agriculture, 2010). Se le define como el área de tejido leñoso resultante del rastro dejado por el desarrollo de una rama, cuyas características organolépticas y propiedades son diferentes a las de la madera circundante. Comúnmente se presentan en la forma de: nudo sano, nudo hueco y nudos arracimados (Echenique Manrique R., 1993).

Nudo sano. Es la porción de rama interconectada con el resto de la madera que no se soltará o aflojará durante los procesos de secado y uso. No presenta rasgos de deterioro ni de pudrición. Este tipo de nudo se forma cuando las ramas están vivas y son envueltas por el material del tronco, resultando así que sus tejidos son continuos con los del xilema (Ceron, 1999).

Nudo muerto. Este tipo de nudo se forma cuando una rama muere y queda un muñón que acaba rodeado por los tejidos del tronco. En este caso no existe continuidad entre los tejidos del nudo y los del tronco y debido a ello los nudos muertos se desprenden con facilidad cuando la madera es aserrada (Echenique, 1993). **Nudos arracimados.** Son dos o más nudos agrupados por las desviaciones de las fibras que los rodean y alteran en gran proporción el grano de toda la pieza. A todo el racimo se le considera como una unidad de nudo (Hoadley, 2000).

La forma del nudo sobre los planos de corte depende de la dirección del corte respecto al nudo. Cuando el corte es perpendicular al nudo éste aparece redondo; si el corte es oblicuo, el nudo aparece ovalado; y si es paralelo al eje, resultan formas alargadas (Echenique, 1993). La mayoría limita la presencia de nudos en función de su diámetro. En la Norma Oficial mexicana NMX-C-409-ONNCCE-1999: “Norma Mexicana de Clasificación Visual de Maderas Latifoliadas para Usos Estructurales”, se indica la forma en que se pueden medir los nudos dependiendo del tipo que sean y de su posición en la madera aserrada (Ceron, 1999).

6.6. La Madera Actual y la Madera de Recuperación

Añadido a las dudas sobre el estado de la madera de Recuperación, con alguna frecuencia se pone en duda su resistencia por el hecho de su antigüedad. Sobre la vejez de la madera encontramos una respuesta taxativa donde concluye que “Los estudios realizados no han detectado ninguna variación en la resistencia de la madera como material”. La vejez de la madera en sí no es ningún problema, (Arriaga *et al.*, 2002).

Los autores exponen que las posibles pérdidas de resistencia tienen otras causas distintas de la edad que lógicamente incluye el historial de cargas, pueden ser por agentes biológicos o por fendas en elementos expuestos a la intemperie. Cuando no se dispone de otras alternativas, se le supone a la madera de recuperación la misma resistencia que le corresponde a la misma especie y procedencia actual, y así se comprueba a la vista de parte de la bibliografía usada (Arriaga,

2002). Tradicionalmente se ha valorado la vejez de la madera debido a que es una madera más estable dimensionalmente frente a cambios de humedad, suele ser menos atacada por xilófagos. Especialmente si se alimentan de almidón, que desaparece con el tiempo. En muchas ocasiones los carpinteros desprecian las maderas viejas, pero por miedo a encontrar clavos durante su manipulación, (Ariza, 2008).

Respecto de la calidad de la madera de recuperación, la tesis de Esteban Herrero 2003, es una de las referencias más completas, además de otras señaladas anteriormente. Señala “la buena calidad de la madera antigua, generosa y con más duramen que las especies de crecimiento más rápido actuales” y concluye que “en la actualidad se dispone de madera de menores dimensiones y en general de menor calidad, por lo que aplicar los criterios actuales a la madera antigua puede conducir a errores“ (Esteban, 2003).

6.7. Degradación de la madera

La madera como material de origen biológico tiene la propiedad de ser biodegradable, y por tanto, su degradación conlleva la modificación de sus propiedades mecánicas. Los agentes que modifican las características de la madera pueden ser organismos vivos como hongos o insectos xilófagos o elementos como el agua, el fuego, la luz, etc. Los organismos xilófagos degradan la madera cuando las condiciones son favorables. En condiciones de temperatura y humedad elevadas los hongos y termitas proliferan de manera importante, mientras que si la madera se encuentra seca es difícil que la degraden. A su vez, hay que considerar que la madera húmeda tiene una menor resistencia que la madera seca (Blogs, s.f.).

McGovern (2011) nos habla del proceso natural de descomposición de la madera citando a (Senalik, 2010; Tiitta, 1998), menciona que este puede causar un daño económico significativo; por eso la importancia de realizar trabajos para comprender los procesos naturales de la descomposición de la madera y cómo mitigarla mediante el uso de tratamientos químicos. Nos menciona también que tales intentos, como el uso de conservantes de madera pueden retrasar el proceso natural de descomposición de la madera, pero hasta ahora no lo previenen.

6.7.1. Patologías de la madera

Los principales agentes degradadores de la madera son los hongos o insectos xilófagos. Los hongos xilófagos son de dos tipos: hongos cromógenos y de pudrición.

Hongos cromógenos, se alimentan del contenido celular de las células vivas de la madera, pero no de la pared celular. El único efecto importante que producen sobre la madera es un cambio de

coloración (azulado) pero en general no afectan a la resistencia mecánica, ya que no alteran la pared celular, responsable de la resistencia de la madera.

Hongos de pudrición, se alimentan de la pared celular, por lo que producen una pérdida de resistencia de la madera. Estos hongos pueden ser de pudrición parda o de pudrición blanca.

Los primeros se alimentan de celulosa y no atacan la lignina, que se caracteriza por un color más oscuro.

Con su ataque, la madera se rompe y deja cubos o formas paralelepípedas, por lo que a veces se denominan también hongos de pudrición cúbica. Los hongos de pudrición blanca se alimentan de lignina, y no atacan la celulosa, caracterizada por un color más claro. Con su ataque, la madera se rompe en fibras, por lo que a veces se les denomina también hongos de pudrición fibrosa (AIDIMA, s.f.).

Para que se produzca la descomposición de la madera, solo requiere la presencia de humedad con la temperatura adecuada. Como resultado, la monitorización de la descomposición de la madera sigue siendo necesaria para garantizar el mantenimiento estructural y los requisitos de seguridad (McGoven, 2011).

Las condiciones higrotérmicas que favorecen el ataque de estos hongos xilófagos son:

Humedad de la madera: debe estar comprendida entre el 20% y el 100%. Por debajo del 20%, el hongo no puede desarrollarse; y por encima del 100% no existe el suficiente oxígeno para que éste viva. El desarrollo óptimo de la mayoría de los hongos xilófagos se alcanza al 40% de humedad.

- *La temperatura* óptima para el desarrollo de los hongos oscila entre 3 y 40°C, encontrándose su óptimo alrededor de los 25°C (Tovar, 1995).

- En el mundo existe una gran diversidad de insectos que se alimentan de madera. Si nos ceñimos a nuestro entorno, los siguientes tipos de insectos xilófagos son los más habituales.

- *Los líctidos* (polillas) tienen larvas que se alimentan del almidón contenido en la pared celular. Sus galerías son de 1 mm de diámetro con serrín; los orificios que dejan en la madera al salir de ella como insectos adultos son también de 1 mm de diámetro. En ocasiones atacan la madera dos veces por año. Atacan principalmente la madera seca de frondosas de vasos grandes y con importante contenido en almidón (roble, castaño, nogal, fresno, olmo) (AIDIMA, s.f.).

- *Los anóbidos* (carcoma fina) tienen larvas que se alimentan de la celulosa de la pared celular. Sus galerías son de 2-3 mm de diámetro con serrín menos fino que el de la polilla; los orificios que dejan en la madera al salir de ella como insectos adultos son también de 2-3 mm de diámetro. Atacan la madera cada año. Atacan madera de todo tipo, tanto de frondosas como de

coníferas. Los daños que causan son más importantes que los de la polilla, pero son estéticos, no estructurales (Tovar, 1995).

- *Los cerambícidos* (carcoma gruesa) tienen larvas que se alimentan de la celulosa de la pared celular. Sus galerías son de 6 mm de diámetro con serrín muy basto; los orificios que dejan en la madera al salir de ella como insectos adultos son también de 6 mm de diámetro y tienen forma elíptica. Atacan la madera cada varios años (de 3 a 11).

Preferentemente atacan madera de coníferas. Los daños que producen afectan a la resistencia de la madera, y pueden debilitarla notablemente si el número de insectos es elevado (Esteban, 1988).

- *Las termitas* existen en el mundo más de 2500 especies diferentes de termitas. Regularmente moran en termiteros o colonias que pueden hospedar hasta más de tres millones de insectos, son capaces de atravesar casi cualquier cosa hasta alcanzar la madera. Inclusive, perforan paredes, supuestamente infranqueables, de hormigón; estas, no son un impedimento para ellas. La mayoría de estos insectos carece de alas pero, esto cambia durante el período de apareamiento y reproducción. Algunas de ellas, desarrollan estas extremidades y luego, abandonan el termitero para levantar sus propias colonias. Se conoce tres tipos básicos de termitas: las termitas subterráneas, las termitas de madera seca y las de madera húmeda. La diferencia que se puede señalar entre ellas es, esencialmente, la ubicación que eligen para construir sus colonias. Las dos clases de termitas que más comúnmente encontramos devorando nuestros hogares son: las de madera seca y las subterráneas (Tovar, 1995).

- *Las termitas de la madera seca* suelen construir sus colonias, y vivir, dentro de estructuras de madera, de ahí su nombre. Construyen sus nidos al interior de su fuente de alimento, su hábitat está en el mismo lugar donde toman su comida. En este caso, debe ser una madera que no posea un alto nivel de humedad, esta variedad, ha sido considerada como la más destructora dentro de su género. Suelen construir termiteros en madera húmeda. Lo que es particular en su caso, es que la humedad que necesitan es mucho menor que la requerida por las termitas de madera húmeda. Estas termitas hacen sus nidos en la madera de los marcos de puertas o ventanas, en muebles y vigas, árboles vivos o muertos (Tovar, 1995).

- *Las termitas subterráneas* se caracterizan por fabricar túneles dedicados, específicamente, a la eliminación de sus excrementos. Las termitas de la madera seca no excavan este tipo de túneles en la madera. Prefieren deshacerse de sus heces perforando un conjunto de pequeños agujeros hacia el exterior. Algunas termitas obreras, de encargan de empujarlos fuera de los termiteros (Esteban, 1988).

6.8. Tratamientos preventivos y curativos para eliminar las plagas de la madera

Es importante saber el contenido de humedad en cada elemento de la estructura y cómo varía el contenido de agua en la madera según la dirección radial y longitudinal del mismo elemento (través de un higrómetro eléctrico portátil). La Humedad es un factor limitante para el desarrollo de hongos e insectos xilófagos (Calicchio, 2009).

Los hongos pueden destruir madera sólo cuando el contenido de humedad de la madera está por encima del 18-20%, de modo que en estructuras de madera internas a los edificios se registran ataques de hongos sólo cuando la madera absorbe humedad a través de la infiltración de lluvia, la presencia de agua en el apoyo en los muros, la condensación de vapor, etc. Un caso típico son las cabezas de las vigas de madera insertadas en las paredes laterales, que son atacadas por hongos, debido a la presencia de humedad transportada por el mismo muro (Calicchio, 2009). Los tratamientos preventivos y curativos para eliminar las plagas de la madera de forma general son: Por impregnación química superficial (líquidos y gel), Inyección química en exteriores, muros, suelos y vigas, Tratamientos biológicos (cebos).

Los insectos de tipo social (termitas) se necesita otro tipo de tratamiento, con la generación de larvas por parte de la reina de la colonia. se usan tratamientos biológicos o cebos y utilizan un principio activo basado en la inhibición de la quitina durante la muda del exoesqueleto en los individuos. Los cebos son pequeños contenedores, de pared o de suelo, que incluyen celulosa (el alimento principal de las termitas) (AIDIMA).

6.9. Propiedades y Clasificación mecánica automática de la Madera

Carballo (2009) cita a Fernández-Golfín *et al.*, 1998 y menciona que a partir de los años 60 se desarrollan en Europa y USA diversas máquinas de clasificación mecánica de la madera estructural. En la mayoría de los casos, el parámetro obtenido es el módulo de elasticidad del material. Habida cuenta que el factor limitante de la bondad del material, al menos en las maderas estudiadas en España, es el comportamiento elástico podemos concluir que es un sistema de aplicación inmediata en aspectos industriales.

El procedimiento consiste en un ensayo a flexión apoyado sometiendo la pieza a carga durante el tramo de comportamiento elástico del material. A partir del diagrama fuerza-deformación se calcula por las fórmulas clásicas de la mecánica, el módulo de elasticidad. Esta adaptación es de utilización habitual en laboratorio y está siendo empleada en la caracterización de maderas comercializadas en España de acuerdo con la normativa de la UE (Carballo, 2009).

Debido a la anisotropía de su estructura, a la hora de definir sus propiedades mecánicas se consideran la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. En este hecho radica la principal diferencia de comportamiento frente a otros materiales utilizados estructuralmente, como el acero y el hormigón.

Las características de la madera varían según su contenido de humedad, la duración de la carga y la calidad de la madera (dureza, densidad, defectos) (Esteban, 1988).

Las propiedades mecánicas de la madera son la expresión de su comportamiento bajo la aplicación de fuerzas o cargas. Este comportamiento puede sufrir varias modificaciones, dependiendo del tipo de fuerza aplicada y de las diferencias básicas en la organización estructural de la madera (Castillo, 1988; Crespo *et. al*, 2008, Jaramillo y Ontaneda, 1989).

6.10. Módulo de Young o Módulo de elasticidad longitudinal

El Módulo de Elasticidad o de Young (E), es la propiedad que tiene un material para resistir la deformación al aplicársele una fuerza externa. En la madera, el módulo de Young varia de manera significativa en las distintas especies y de acuerdo con el grado de humedad.

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Muchos materiales sólidos, incluyendo los resortes obedecen la ley de Hooke, por lo que el cociente del esfuerzo a la deformación de un material sólido es constante. A este cociente se le llama módulo de Young (ver figura 6.7), (W. Chen, 2013; Ambrose, 1998).

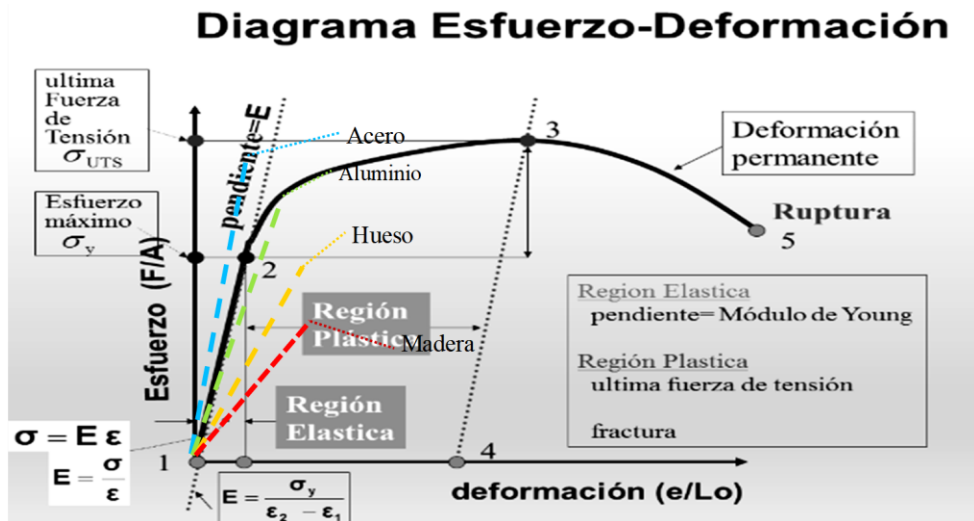


Figura 6.7. Diagrama de Esfuerzo-de formación Deformación (e/Lo), Fuerza de Tensión pendiente = E, ultima fuerza de tensión fractura, Esfuerzo (F/A), (1 a 2) Región Elástica, (2 a 3) Región Plástica, (5) Ruptura ultima, (1 a 2) Región Elástica pendiente = Módulo de Young, (2 a 3) Región Plástica (3 a 4) Deformación permanente, (5) Esfuerzo máximo (Tumero, 2010).

En la madera existen dos módulos de elasticidad, en las fibras en sentido paralelo: el Módulo de Elasticidad a la Tracción, y el Módulo de Elasticidad a la Compresión; la resistencia ante dichas fuerzas adquiere valores diferentes (Fernández,1991; Ambrose, 1998).

El módulo de elasticidad usado es único para la dirección paralela a las fibras, adoptando un valor aparente de E en flexión, sus unidades de medida son kg/cm². Donde E tiene la misma unidad que el esfuerzo, N/m² o pascales (Pa) kg/s² m (Giuliano, 2009).

$$\frac{M}{LT^2} = \left(\frac{\text{masa}}{\text{longitud} \cdot \text{tiempo}^2} \right) \quad \text{Ecuación 5. Dimensiones del Módulo de Young.}$$

$$\text{Módulo de Young, } E = \frac{\text{Esfuerzo longitudinal o de tracción}}{\text{Deformación longitudinal o por tracción}}$$

Ecuación 6. Módulo de Young.

Hasta hace unas décadas era frecuente en obras de rehabilitación y restauración la sustitución directa y sistemática de las estructuras de madera por estructuras metálicas por el simple hecho de la desconfianza o el desconocimiento de la madera.

La Tabla 6.1 muestra la Comparación de eficacia estructural en relación al peso y precio y los valores del módulo de elasticidad de algunos de los materiales mas empedados en la construcción y de algunos tipos de madera, (Argüelles *et al.*, 2000).

Tabla 6.1. Comparación de eficacia estructural en relación al peso (Argüelles *et al.*, 2000).

Material	Relación resistencia / peso		Relación rigidez / peso	Relación rigidez / precio
	Madera limpia, valor de rotura	Madera clasificada, valor admisible		
Acero	1	1	1	2,2
Madera	3,6	1	1,3	1
Material	E Módulo de elasticidad			Kg/cm ²
ACERO				2.100.000
ALUMINIO				700.000
HORMIGÓN				220.000
MADERA DURA				120.000
MADERA SEMI DURA				100.000
MADERA BLANDA				80.000

La resistencia de toda la madera esta ligada a la densidad del material, si consideramos el peso volumetrico como un parametro directamente ligado con la densidad del material, bastaria con señalar que mientras que el pino puede tener un peso volumetrico de 430 kg/m³, el fresno y el encino por ser más densos, llegan a tener valores de alrededor de 690 kg/m³.

La estructura interna de la madera influye drasticamente en la capacidad de carga, ya que acepta esfuerzos máximos en el sentido longitudinal y mínimos en el sentido transversal y su

comportamiento anisotropico aumenta conforme su densidad disminuye,(Esteban, 1988; Askeland, 2016).

La madera tiene un comportamiento elástico de manera que la deformación que experimenta bajo la acción de una carga cesa al desaparecer la misma. Su comportamiento se define como Lineal elástico ya que las deformaciones a la magnitud de las cargas a que esta sometida. Este comportamiento se presenta dentro de ciertos limites, que definen un rango de tensiones admisibles apropiado para la utilización de este material en elementos estructurales, (Argüelles *et al.*, 2000).

Se entiende por fuerza externa, a cualquier solicitación que, actuando exteriormente, altere su tamaño, dimensión o la deforme. Se definen como aquellas que miden la aptitud y habilidad de la madera para resistir fuerzas externas.

Estas propiedades son prioritarias cuando la madera se destina a la construcción civil y no dejan de tener importancia en muchos otros casos., (Castillo, 2004).

En todos los casos la orientación de las fibras es determinante en los resultados de ls pruebas, asi por ejemplo la madera posee una mayor resistencia a la compresión si la fuerza aplicada es paralela a las fibras. Si la carga es aplicada en forma perpendicular a las fibras, la capacidad disminuye, en promedio este valor es de aproximadamente un 30% de la resistencia obtenida cuando las fibras son paralelas a la carga. La Tabla 6.2 muestra los valores de las Propiedades Mecánicas de algunas especies de madera de coníferas más empleadas, (Maderas, 2014).

Tabla 6.2. Propiedades Mecánicas de algunas especies de madera, (Maderas, 2014).

Madera (12% de humedad)	Compresión () kg/cm ²	Cortante (⊥) kg/cm ²	Módulo de Ruptura, kg/cm ²	Módulo de Elasticidad, kg/cm ²
Caoba	473	120	795	91,800
Maple	491	174	1,000	95,880
Fresno	543	169	1,183	121,380
Encino	526	139	989	103,020
Abeto	492	118	928	107,100
Pino	429	95	816	84,660

Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra son mucho más elevados que en la dirección perpendicular. Para conocer las posibilidades estructurales de

la madera es obligado analizar sus características mecánicas y compararlas con las de otros materiales (Maderas, 2014).

La Tabla 6.3 y la Tabla 6.4 presenta los Valores promedio de la resistencia de las Propiedades mecánicas de algunas maderas de coníferas en kg/cm², (Herrero, 2003; Argüelles et al., 2000).

Tabla 6.3. Valores promedio de la resistencia de las Propiedades mecánicas de algunas maderas, (Herrero, 2003).

Flexión	f'_{fu}	170
Tensión paralela a la fibra	f'_{tu}	115
Compresión paralela a la fibra	f'_{cu}	120
Cortante perpendicular a la fibra	f'_{nu}	40
Cortante paralelo a la fibra	f'_{vy}	15
Módulo de elasticidad promedio	$E_{0.50}$	100,000
Módulo de elasticidad correspondiente al 5º percentil	$E_{0.05}$	55,000

Tabla 6.4. Propiedades Mecánicas de algunas especies de madera de coníferas en kg/cm², (Argüelles et al., 2000).

	Flexión (Kg/cm ²)			Tracción (Kg/cm ²)		Compresión (Kg/cm ²)		Corte (Kg/cm ²)
	σ_{dis} Min.	σ_{dis} Max	MOE	σ_{dis} = fibra	σ_{dis} ⊥ fibra.	σ_{dis} = fibra	σ_{dis} ⊥ fibra.	τ_{dis} = fibra
<i>Pino Ponderosa</i>	45*	55*	42.000	30*	2	38	10	5
<i>Pino Radiata</i>	45*	60*	50.000	32*	2	40	12	5
<i>Pino Misionero</i>	65*	75*	70.000	42*	3	54	15	7
<i>Álamo</i>	45*	55*	42.000	30*	2	38	10	5
<i>Lenga</i>	80*	90*	90.000	51*	3	64	18	8

El módulo de elasticidad más usado es el paralelo a las fibras, sin embargo este es diferente ya se trate de solicitaciones de compresión o de tracción. Para materiales cuya longitud es mucho mayor que el ancho o espesor, se tiene precaucion por el Módulo longitudinal de elasticidad, (Askeland, 2016).

No se han determinado experimentalmente valores exactos para los módulos de elasticidad, sin embargo, se pueden determinar en forma aproximada a través de las siguientes expresiones (ver figura 6.8).

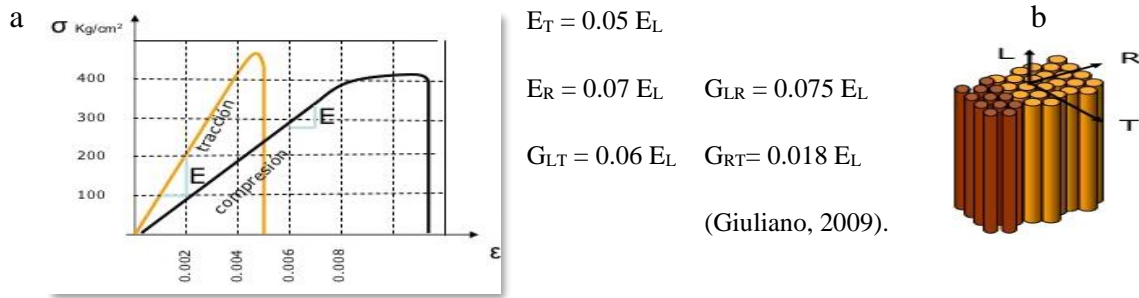


Figura 6.8. Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos atracción y compresión (a), esquema de las fibras de la madera en sus ejes principales (b), (Giuliano, 2009).

6.10.1. Resistencia a la flexión

Se denomina así al esfuerzo que realiza una pieza de madera colocada sobre dos apoyos y que recibe un peso en el centro. Otra prueba similar consiste en sujetar la pieza por uno de sus extremos y situar el peso o la fuerza aplicada en el extremo contrario (Viña, 1997). La madera posee una elevada resistencia a la flexión comparada con su densidad. La flexión se origina por un momento flector que produce en la pieza tensiones de compresión y de tracción paralela a las fibras, teniendo sus valores máximos en las fibras extremas y nudos. Este puede ser de signo positivo o negativo dependiendo de concavidad que tiende a generar en la viga. (Pytel y Singer, 2008).

El comportamiento a la flexión es una combinación del comportamiento a compresión y a tracción paralela de la madera. Valores característicos de diseño 70- 340 kg/cm². Se refiere a una acción externa que tiende a curvar o flexionar un cuerpo. Si bien puede ser generado por una carga puntual o distribuida, mecánicamente representa un momento, el cual es conocido como momento flexionante,(Chen, 2013; Ambrose, 1998).

Ante una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga como la madera es un producto natural, su estructura depende de la forma en que crece y no de la manipulación por parte de los seres humanos, como en el caso de los metales, (Martínez y Vignote, 2005; Mott, 2009).

Indicaremos, tres fuerzas mecánicas (resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción) y el valor del módulo de elasticidad. La madera puede estar en distintas posiciones a la hora de enfrentarse a las fuerzas de flexión: entre dos apoyos, sobre dos apoyos o adherida a una pieza. Esta propiedad es muy importante cuando las piezas son largas y finas (estantes, bancos, suelos). La resistencia de la madera a la flexión suele ser muy grande, (ver figura 6.9), (Giuliano, 2009).

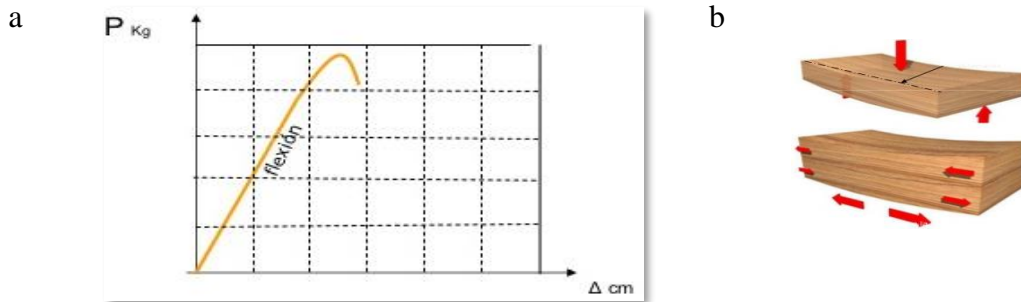


Figura 6.9. Relación tensión – deformación de una conífera libre de defectos a flexión (a) y diagrama de resistencia a la flexión en madera (b). (Salas, 2013), (Giuliano, 2009).

6.10.2. Resistencia a la compresión

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

La resistencia a la compresión es la fuerza que realiza la madera contra tensiones que tienden a aplastarla. El efecto de aplastamiento es mayor con las fibras de sentido perpendicular, en el sentido contrario. Un esfuerzo de compresión es uno que tiende a aplastar el material del miembro de carga y a acortarlo (Chen, 2013; Mott, 2009).

La resistencia a compresión perpendicular a la fibra es muy inferior a la paralela. El comportamiento tensión- deformación es lineal es una primera etapa y luego tiene una línea deformación plástica, debido al aplastamiento de la madera, sin llegar a la ruptura clara. Este tipo de esfuerzos es característico en las zonas de apoyos de vigas, donde se concentran la reacción en pequeñas superficies y debe transmitirse sin deformaciones importantes o aplastamientos. Valores característicos de diseño 30-70 kg/cm². (ver figura 6.10), (Ambrose, 1998; Giuliano, 2009).

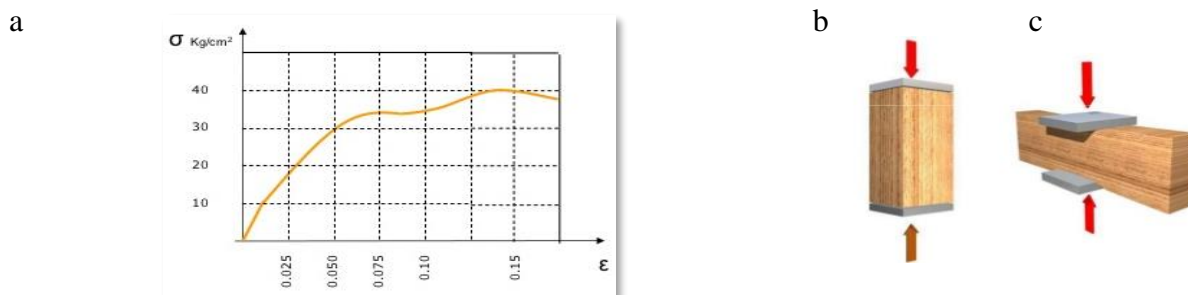


Figura.6.10. Relación tensión-deformación a compresión perpendicular (a), esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras, (b y c) esquema de ensayo de compresión normal a las fibras. (Salas, 2013; Giuliano, 2009).

6.10.3. Módulo de Corte

Un esfuerzo cortante del cuerpo y deja el volumen invariable. El módulo de corte S se define como la razón del esfuerzo cortante F/A , a la deformación de corte tangencial. El esfuerzo de corte origina tensiones tangenciales que actúan sobre la fibra de la madera según diversos Modos:

En el caso de la resistencia al esfuerzo cortante, la madera presenta una mayor resistencia cuando la fuerza cortante actúa en forma perpendicular a la orientación de las fibras. Todo mundo sabe que para hacer leña de un tronco de madera, el golpe del hacha debe ser paralelo a las fibras con el propósito de desgajarlo fácilmente. Aunque la madera posee una muy buena capacidad a la tensión (tres veces mayor que la compresión), siempre y cuando la fuerza se aplique en forma paralela a las fibras, usualmente no se le trabaja en este sentido en forma directa (una excepción son algunos elementos en las armaduras de madera), (Askeland, 2016).

La resistencia a la flexión se obtiene mediante una prueba de flexión en la cual un espécimen apoyado libremente se carga al centro (flexión de tres puntos) hasta hacerlo fallar, calculando de aquí el esfuerzo máximo a la flexión o módulo de ruptura. (Askeland, 2016).

Experimentalmente el módulo elástico transversal (o módulo cortante) puede medirse de varios modos, conceptualmente la forma más sencilla es considerar un cubo como el de la figura 6.11 y someterlo a una fuerza cortante, para pequeñas deformaciones se puede calcular la razón entre la tensión y la deformación angular (Ambrose, 1998).



Figura 6.11. Cubo sometido a una fuerza cortante (a) diagrama del esfuerzo cortante (b), (Ambrose, 1998).

$$S = \frac{F/A}{\tan\theta}$$

Ecuación 7. Módulo de Corte S o Tensión cortante.

$$\text{Esfuerzo} = \frac{F}{A}$$

Ecuación 8. Esfuerzo por unidad de área.

La deformación es el ángulo expresado en radiales: el módulo de corte S se define como la razón del esfuerzo cortante F/A , a la deformación θ .

$$\text{Deformación} = \theta = \frac{d}{l}$$

Ecuación 9. Relación de Deformación angular.

- Tensión tangencial de cortadura, las fibras son cortadas transversalmente por el esfuerzo. La falla se produce por aplastamiento. El esfuerzo es igual a fuerza por unidad de área. (ver figura 13 a).
- Tensión tangencial de deslizamiento, la falla se produce por deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en dirección longitudinal. (ver figura 6.12 b).
- Tensiones tangenciales de rodadura, la falla se produce por rodadura de unas fibras con respecto a otras. (ver figura 6.12 c).



Figura. 6. 12. Tensión tangencial de cortadura, (a) tensión tangencial de deslizamiento (b) y tensiones tangenciales de rodadura, (c), (Giuliano, 2009).

6.10.4. Resistencia a la tracción

Es la fuerza que realiza la madera ante dos tensiones de sentido contrario que hacen que disminuya la sección transversal y aumente la longitud. Aunque en la producción de mueble tiene muy poca importancia, es muy importante en estructuras de madera (W. Chen, 2013). La madera posee una elevada resistencia a tracción paralela a las fibras. En madera libre de defectos la resistencia es mayor que la flexión. La relación σ - ϵ es prácticamente lineal. Valores característicos de diseño 40- 180 kg/ cm². La madera posee una elevada resistencia a Compresión paralela a las fibras, (Askeland, 2016; Ambrose, 1998).

En madera libre de defectos la relación es σ - ϵ es prácticamente lineal en la primera fase y luego no lineal en la segunda. El E en compresión paralela es algo menor que en tracción paralela. En madera libre de defectos la relación de la resistencia a tracción resulta mayor que la de compresión paralela, en cambio en maderas con defectos esta relación se invierte. (Giuliano, 2009). Valores característicos de diseño 50- 260 kg/ cm² (ver figura 6.13).

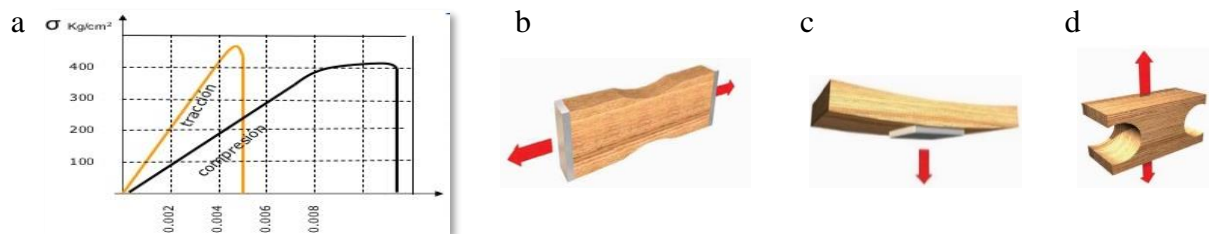


Figura. 6.13. Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos a tracción y compresión (a), diagrama ensayo de tracción paralelo a las fibras (b) ensayo de tracción normal a las fibras (c) ensayo de tracción normal radial a las fibras (d). (Salas, 2013; Giuliano, 2009).

6.11. Vigas y zonas críticas

Las zonas críticas se caracterizan por la dimensión y la posición de defectos específicos que pueden influir en las características de resistencia y rigidez, así como en las propiedades mecánicas. En caso de alteraciones que no sean visibles en la superficie de los elementos de madera. El levantamiento debe continuar con la ejecución de pruebas no destructivas en relación con la longitud de los elementos de madera y, si es posible, en relación con su sección transversal. En este último caso, se determinará la sección el coeficiente, que es el corte transversal menos las áreas dañadas. (Calicchio, 2009).

Las vigas son elementos que trabajan a flexión y a cortante o cizalladura cuando se someten a cargas perpendiculares a su plano. En los puentes construidos con vigas el flujo de carga pasa del tablero a unas vigas secundarias transversales y de éstas a las vigas longitudinales principales, que se apoyan en los estribos o pórticos (ver figura 6.14) (Ambrose, 2002).

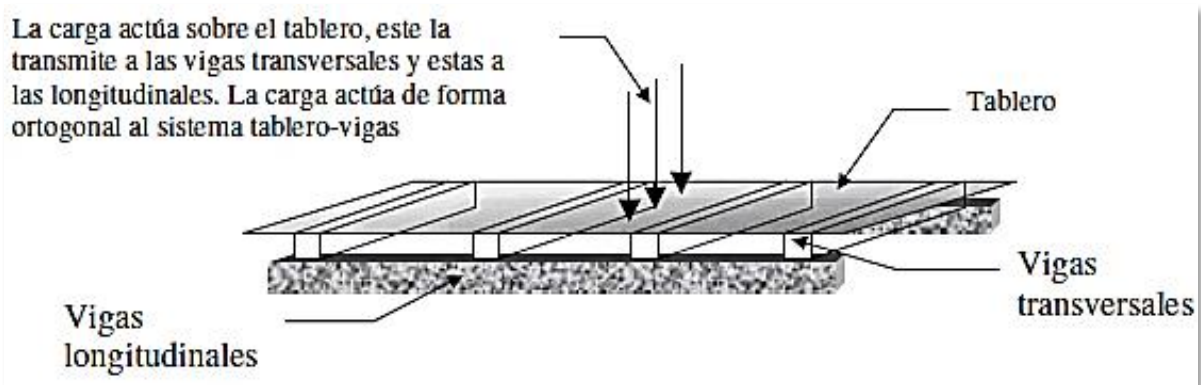


Figura 6.14. Entramado de vigas trasversales y longitudinales en un puente de vigas (Duque, 2004).

Una vez la carga es transmitida por las vigas longitudinales principales a los apoyos, se genera en estos una reacción igual a la carga aplicada, es decir, la viga no necesita de reacciones extras para poder trabajar a flexión y a cortante, (ver figura 6.15), (Ambrose, 2002).

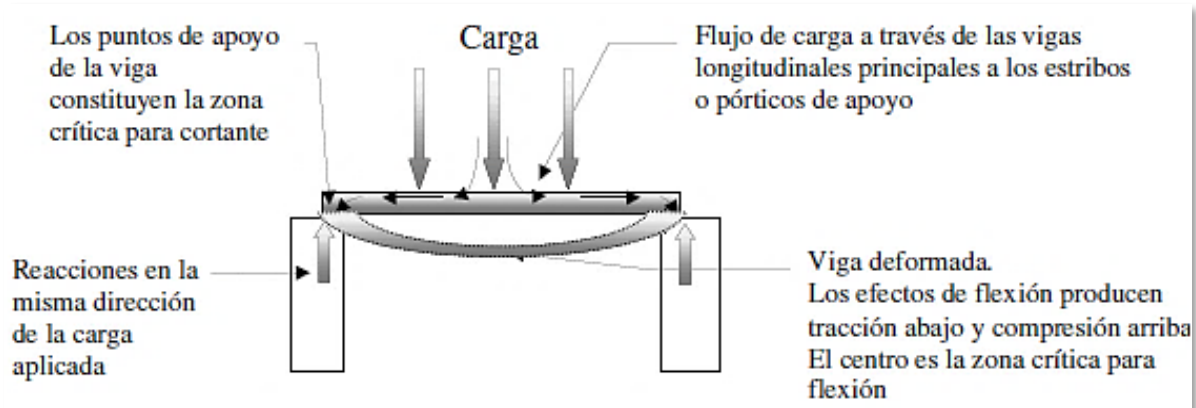


Figura 6. 15 Forma de trabajo de un puente con vigas (Duque, 2004).

Los efectos de flexión y cortante corresponden a las fuerzas internas desarrolladas en los elementos. Para el caso particular del concurso de puentes la carga aplicada corresponde a una carga central; despreciando el efecto del peso propio, las fuerzas internas son las que muestra la figura 6.16.

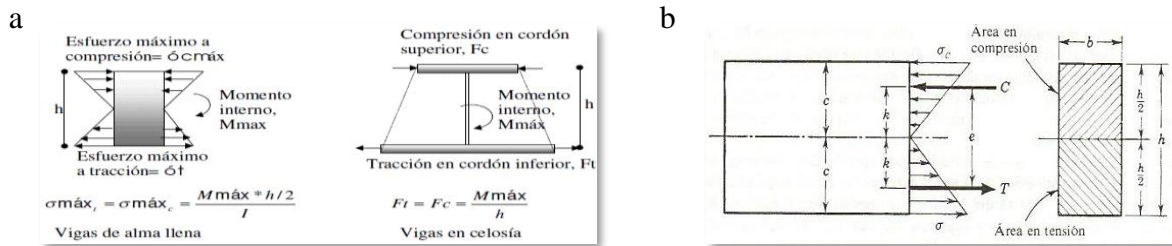


Figura 6.16. Distribución de esfuerzos por flexión (a), distribución de esfuerzos internos según la composición de una viga (b). (Duque, 2004).

Las vigas se pueden construir de alma llena (compacta). En la figura 6.17 se muestra la distribución de esfuerzos internos según la composición de la viga (Duque, 2004).

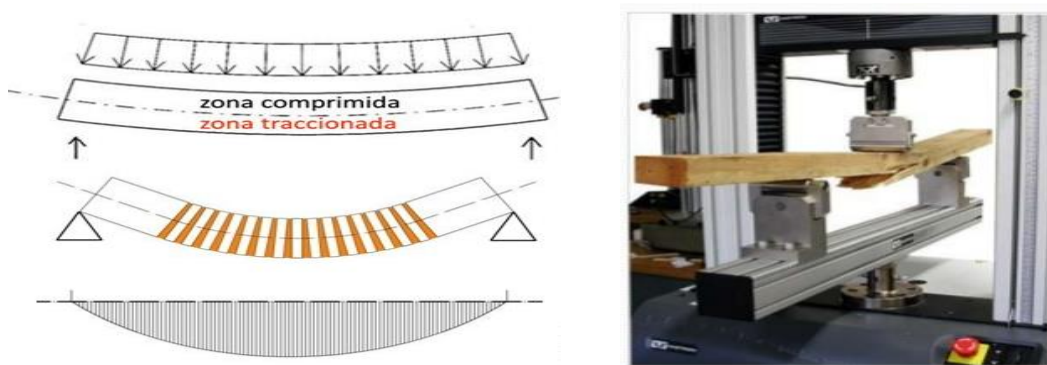


Figura. 6.17. Diagrama de momentos, donde vemos las fuerzas verticales y esfuerzos de flexión. Se pueden observar las zonas comprimidas y las zonas traccionadas, Prueba de flexión estática tradicional.

6.12. Los ensayos sobre la madera

Los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas se realizan sea cual sea la norma utilizada, generalmente con el objeto de proponer los usos probables y dar al ingeniero los datos necesarios para el cálculo de estructuras de maderas. Es necesario que los datos obtenidos permitan el uso adecuado de la madera en proporción mínima, y que garanticen seguridad en cuanto a parámetros de diseño (Castillo, 1988).

De manera general podemos adoptar la lista de ensayos que se muestra en la GACTEP (Datos para la Evaluación, Anejo A.2 “Madera”), entre ellos, identificación de la especie, Clasificación visual, Varios ensayos de determinación de la densidad de la madera, Humedad, Velocidad de ondas acústicas, Muestras de la madera, Ensayos de carga informativos.

La clasificación visual de la madera se puede realizar en esta fase o en la fase siguiente de aplicación de ensayos en el sitio. Finalmente, cabe la posibilidad de realizar algunos ensayos en el laboratorio mediante la extracción de probetas o desmontando vigas.

6.12.1. Inspección visual y organoléptica

La norma italiana UNI-11.119 desarrolla las condiciones para la inspección en el sitio para el diagnóstico de elementos estructurales. En la inspección, se centra en la clasificación visual, aunque engloba otros aspectos lógicos en una intervención de rehabilitación. Entre estos señala la necesidad de realizar ensayos de identificación de especie, de humedad, hace hincapié en la adecuada definición geométrica, etc.

6.12.2. Ensayos de humedad y densidad

La determinación de la humedad en el sitio mediante xilohigrómetros portátiles forma parte del estudio básico de evaluación de una estructura de madera existente (CTE, Art.5.3.4.3) porque su presencia se relaciona con los ataques biológicos. Como bien se sabe, la madera con un contenido continuado de humedad de un 20% o superior sufrirá ataques biológicos y se degradará.

Tampoco podemos olvidar la importancia de estas humedades en el resto de la edificación. La humedad influye en todas las propiedades de la madera, tanto en los ensayos de laboratorio como en END (Ensayos no Destructivos) la combinación de estas mediciones con la de la humedad mejora la fiabilidad de los resultados obtenidos, (Gómez, *et. al.*, 2018).

Entre otros muchos autores, Rodríguez y Rubio, 1995 relacionaron las medidas de ultrasonido con el contenido de humedad obteniendo sus propias correlaciones. La densidad (o la cota de densidad según la especie) era, antes de la aparición de la moderna clasificación, un indicativo de la calidad de la madera.

6.12.3. Ensayos de laboratorio

Los ensayos forman parte habitual de cualquier intervención. En los ensayos se establece generalmente la diferencia entre los destructivos y los no destructivos. Se entiende que los ensayos de laboratorio son habitualmente ensayos destructivos. (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

6.12.4. Ensayos sobre probetas de pequeño tamaño

Dentro de los ensayos destructivos están los ensayos que se realizan sobre probetas de tamaño pequeño, que permiten la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Generalmente se usan la determinación del peso específico, y el ensayo en flexión estática. Encontramos ejemplos de aplicación de estos ensayos en el artículo por Rodríguez y Rubio 1995,

donde se establece un coeficiente de correlación basado en las tensiones básicas. Dicho coeficiente aparece entre otras, en la publicación de Argüelles y Arriaga, 1987.

6.12.5. Ensayos sobre probetas de tamaño real

Existe la posibilidad de realizar ensayos sobre vigas de tamaño real, por ejemplo, aplicando el dispositivo de ensayos según la norma UNE-EN 408:2003. Se pueden obtener datos directos de MOE y MOR. Se muestra un ejemplo de aplicación de estos ensayos en obra en (Ariza, 2008).

Si bien los ensayos sobre vigas de tamaño real ofrecen datos “reales”, tienen varios inconvenientes. Son costosos y puede ser inaceptable destruir varias vigas. Además, para que sean estadísticamente representativos, se necesitan muchos ensayos. Estos ensayos son un caso típico de ensayo destructivo. Al menos se han de desmontar las vigas y trasladarlas al laboratorio.

Aunque no es imprescindible destruir las vigas, pues se puede obtener sólo el MOE sin dañar la viga, y en general esto será suficiente para establecer la clase resistente, ya que es aceptado comúnmente que limita más el MOE que el MOR, (Arriaga, 2007).

Respecto de este tipo de ensayos, diversas referencias reconocen el inconveniente que únicamente se podrán realizar sobre un número pequeño de piezas, y por tanto proporcionarán un resultado poco representativo (Esteban 2003; Arriaga y Esteban, 2001).

La conclusión de la CTE (Art.5.3.1, “Materiales, cuestiones generales”) incide en el mismo sentido respecto a cualquier ensayo en general: “Cuando el número de resultados sea reducido, la aplicación de los métodos clásicos de la estadística puede conducir a valores conservadores, debido a la influencia de los errores de estimación. En estos casos, si se dispone de información previa, esta debería combinarse con los resultados obtenidos, para mejorar la información,” (Ariza y Ariza, 2016).

6.12.6. Ensayos realizados en el lugar, clasificación visual y técnicas no destructivas

Los ensayos no destructivos son en general medidas indirectas realizadas en el sitio, a partir de las cuales, con limpieza, y sin destruir (o con una alteración mínima) ni desmontar las piezas de madera, es posible obtener: la humedad, la densidad, MOR y MOE o la equivalencia a clase resistente, (Gómez, *et. al.*, 2018). En general van unidos la clasificación visual y las técnicas no destructivas, así se expresa explícitamente en la CTE “Datos para la evaluación” (Art.5.3.4.1-2). Donde además encontramos que: “Las técnicas no destructivas, en conjunto con la clasificación visual permiten un mayor aprovechamiento del material”. La Guía ofrece una lista somera de los ensayos no destructivos y algunos otros como los ensayos de pruebas de carga.

El informe de norma UNE (UNE41805-8, Art.5.1) también recoge diversos ensayos no destructivos. En el libro de Arriaga y otros (2002) donde se expone un listado de END algo más exhaustivo, donde las técnicas aplicables son:

Ultrasonidos, Vibraciones inducidas, Resistógrafo, Medida de la densidad superficial (añado PILODYN y arranque de tornillos), Gamma-densitometría, Fractómetro, Datación de la madera, Detección acústica de insectos xilófagos.

El mayor inconveniente que tienen los END es que al tratarse de medidas indirectas, la medida de la resistencia o rigidez de la madera puede quedar muy penalizada por la variabilidad de la madera. Sin embargo, la intensa investigación en estas técnicas está llevando a resultados excelentes, que permiten obtener viga a viga su capacidad mecánica o evaluar el grado de deterioro sufrido y dónde aparece el mismo. Una de las soluciones es la combinación de varias medidas, (Gómez, *et. al.*, 2018).

Encontramos referencias sobre el panorama actual de la aplicación de estas técnicas a la madera estructural en el artículo de (Carvalho, Hermoso y Díaz, 2010; Araujo, 2006) se realiza una comparativa de los mismos. Otras referencias en el mismo sentido son (Carballo *et al.*, 2009; Lombillo, 2006, 2008).

También hay una abundante bibliografía que muestra ejemplos de aplicación de END en edificios históricos, en general centrados en la técnica de ultrasonidos, que es la más extendida, aunque no la única. Entre estas referencias señalamos los trabajos de (Rodríguez y Rubio, 1995; Basterra, 2009) donde se realiza una extensa aplicación de la clasificación visual, los ensayos de resistógrafo, y ultrasonidos; (Capuz *et alt.*, 2006) aplicada a la Lonja de los Mercaderes, Valencia, en la que se realizaron medidas por ultrasonidos e hizo una valoración de la clase resistente con diversas hipótesis. El artículo de (Calicchio *et al*, 2012) describe la aplicación integrada de: resistógrafo, clasificación visual, xilohigrómetro, además de las ya citadas de identificación de especie y dendrocronología.

6.12.7. Ensayos de ultrasonidos

Sandoz (1989), uno de los pioneros en el uso de los ultrasonidos en la madera estudió la influencia de diversas propiedades de la madera en estas medidas. Las medidas pueden ser transversales o longitudinales, siendo estas últimas las que ofrecen mejores correlaciones con las propiedades mecánicas en conjunto. Landa (1999) estudió esta técnica en probetas pequeñas libres de defectos. Diversos autores han establecido diversas correlaciones entre la velocidad de propagación de los ultrasonidos, en general en sentido longitudinal, y las propiedades mecánicas (MOE/MOR), estas correlaciones son: E_L (valor del ensayo), $E_T = 0.05 E_L$, $E_R = 0.07 E_L$, G_{LT}

= 0.06 E_L, G_{LR} = 0.075 E_L y G_{RT}= 0.018 E_L (Giuliano, 2009; Sandoz, 1989), (Ramon *et al.*, 2005; Arriaga *et al.*, 2002).

Actualmente también se emplea en la clasificación de madera nueva, valgan como ejemplos: la DIN 4074; o TRIOMATIC®, maquinaria de clasificación. Es especialmente adecuada en la clasificación de madera en rollo debido a la dificultad otros métodos (Hermoso *et al.*, 2007).

La determinación de las lesiones en la madera es uno de los usos más importantes de esta técnica. Existen diversos trabajos en donde se estableció la relación entre las medidas normales y deterioro, las correlaciones entre la velocidad de transmisión de ultrasonido en maderas con la influencia de diverso grado de deterioro, y contenido de humedad, (Rubio, 2000; Wilcox, 1988; Brashaw *et al.*, 2005; Mantilla *et al.*, 2009). Encontramos abundantes ejemplos de aplicación de estas técnicas en el ámbito patrimonial, (Basterra *et al.*, 2009; Rodríguez y Rubio, 1995; Rodríguez *et al.* 2004; Capuz *et al.*, 2006).

Actualmente los sensores de ultrasonido más empleados son los fabricados por Silvatest y Fakopp. Estos equipos tienen uso tanto en la silvicultura como en la jardinería urbana, en la clasificación de madera nueva; en la determinación de los deterioros, y en la obtención de los parámetros MOE / MOR de la madera en servicio.

En el ámbito de la madera, la empresa Fakopp fabrica sistemas de medición por vibraciones para clasificación o para la estimación de la rigidez real de piezas. En sus notas técnicas (www.fakopp.com) podemos encontrar descripciones del método, así como en el artículo de (Ariza y Ariza, 2016).

También este tipo de ondas son ampliamente usadas en la inspección y caracterización de materiales. Las ondas transversales son aquellas en las que el movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de la propagación Para México la normativa nos dice que toda la documentación pertinente deberá ser compilada, catalogada, depositada en lugar seguro y resultar accesible cuando resulte necesario.

La documentación deberá explicitar también las razones específicas que hayan motivado la selección de los materiales y métodos utilizados para los trabajos de conservación. (Blogs, s.f.). Cualquier intervención deberá ser precedida de un diagnóstico exhaustivo y riguroso de las condiciones y causas del deterioro y degradación de las estructuras de madera.

El diagnóstico se apoyará en la evidencia documental, en una inspección de hecho y un análisis material, si fuera necesario, no solo en comprobaciones de las condiciones físicas, sino también en métodos basados en pruebas no destructivas (ICOMOS 1999).

6.13 La influencia de las Propiedades Químicas de la Madera y su Deterioro

El contenido de madera debido a procesos de adsorción o desorción conduce a cambios dimensionales y puede resultar en daños irreversibles como deformación, agrietamiento o delaminación. Para evitar estos resultados, sería deseable proporcionar un clima estable. Sin embargo, una condición climática estable y favorable esto no siempre es posible, por razones técnicas o financieras. La acción COST IE0601 “Madera Ciencia para la conservación del patrimonio cultural” se puso en marcha en abril de 2007 para abordar este problema. Su objetivo principal era proporcionar un compromiso entre el acondicionamiento climático suficiente y los costos mediante determinar el alcance de las fluctuaciones climáticas aceptables durante el almacenamiento, (Kránitz, 2016).

Para este propósito, el conocimiento sobre el comportamiento higroscópico y las propiedades mecánicas de la madera envejecida es vital. Sin embargo, dicha información también puede ser útil cuando se considere la reutilización de madera envejecida, una opción que está ganando más atención con el aumento de los precios de la madera y una mayor conciencia de sostenibilidad desarrollo, (Kránitz, 2016).

Sin embargo, el proceso de envejecimiento de la madera y las propiedades de la madera envejecida apenas han sido investigados hasta ahora. Además, los resultados de los estudios suelen ser contradictorios y, en general, difíciles. para comparar entre sí, ya que tanto la especie de madera como la edad de los especímenes, varían y a menudo los métodos utilizados también son diferentes. El estudio actual, que se llevó a cabo en parte dentro de la acción COST IE0601 mencionada anteriormente (acción finalizada en octubre de 2010), tiene como objetivo llenar este vacío científico y contribuir al conocimiento sobre el proceso de envejecimiento de la madera, (Beyer, 2018).

Los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de la madera debido al envejecimiento se originan por cambios en la microestructura y, en efecto, por cambios químicos en los componentes. Desde el almacenamiento condiciones determinan qué tipo de procesos químicos pueden ocurrir, es obvio que tienen un efecto significativo sobre el proceso de envejecimiento. En el caso de la madera, las condiciones aeróbicas y anaeróbicas deben identificarse (Fengel 1991).

En el caso de la madera almacenada al aire, se debe considerar si los objetos están expuestos a meteorización o no. La madera expuesta a la luz solar directa sufre degradación química causada por los rayos UV radiación. Según Norrstrom (1969) en Kuo y Hu (1991), la lignina aporta el 80-95%, carbohidratos 5-20% y extractos aproximadamente 2% del coeficiente

de absorción total de la madera. Así, la lignina es el componente de la pared celular más sensible a la luz ultravioleta, (Beyer, 2018).

También se demostró que la lignina transfiere la de la luz ultravioleta a la celulosa se degrada la celulosa (Yoshimoto 1972). Además, fotodegradación, la degradación térmica superficial también debe tenerse en cuenta ya que la superficie La temperatura de la madera irradiada al aire libre puede alcanzar los 60-90 ° C dependiendo de su color (Tolvaj y Molnár 2008). Además, se produce la erosión de la madera a través del viento y la lluvia (Unger et al. 2001). Permitiendo que las sustancias fotodegradables se eliminen fácilmente (Nemeth 1998).

La madera expuesta a la meteorización también está sujeta a tensiones mecánicas debido a las fluctuaciones de temperatura y humedad. (Borgin y Col. 1975). Estos efectos juntos conducen a la descomposición de las capas superficiales (Unger *et al* N2001) y dar como resultado una superficie gris a cuadros a largo plazo.

Los cambios rápidos en la humedad relativa generan una distribución desigual de la humedad en la madera, lo que conduce a la formación de tensiones inducidas por la humedad que pueden causar daños estructurales en el material (Erhardt, *et., al.;* 1996) afirman que los objetos con estructura asimétrica o contruidos a partir de más materiales que tienen diferentes propiedades higroscópicas son los más amenazados por los cambios de humedad. La madera es más estable cuando se almacena en interiores con aire seco. Debido a condiciones favorables (baja temperatura y radiación UV, sin contacto con agua líquida, condiciones de humedad estables) el efecto del envejecimiento de su estructura parece ser mínimo al menos hasta una edad de 4400 años, si no hay ataque de insectos u hongos (Nilsson y Daniel, 1990).

El comportamiento de la madera y el historial de carga del material deben tenerse en cuenta cuando investigando el efecto del envejecimiento sobre las propiedades mecánicas. La literatura sobre el comportamiento reológico de la madera es bastante voluminosa Bodig y Jayne (1993) o Smith *et al.* (2003). La madera es un material viscoelástico. Si bien se supone que su comportamiento mecánico es elástico en cargas a corto plazo, debe considerarse viscoso a largo plazo. Cuando la carga se mantiene durante un más tiempo, se desarrolla una deformación dependiente del tiempo además de la deformación elástica que aparece se aplica la carga. Esta tensión aumenta con el tiempo incluso cuando la carga permanece constante, (Ghavidel, 2020).

El comportamiento de fluencia es el resultado de cambios estructurales a nivel molecular. Cuando la madera se somete a carga, primero tiene lugar una reorientación de sus moléculas. A niveles de estrés más altos, se produce deslizamiento y posteriormente se destruyen los enlaces químicos, lo que resulta en daños estructurales irreversibles y se reduce fuerza. Los factores

importantes que influyen en el comportamiento de la fluencia son el nivel, la duración y el tipo de carga. El historial de carga anterior, el contenido de humedad de la madera y las condiciones ambientales también influyen (Niemz 1993).

Cuando se retira la carga, se produce una recuperación de la deformación. Mientras que la parte elástica de la deformación se recupera inmediatamente, la recuperación de la fluencia depende del tiempo y su velocidad se ve afectada también por las condiciones ambientales. Bajo carga cíclica, cuando no hay suficiente tiempo para total recuperación, la deformación por fluencia se acumulará a lo largo de los ciclos, lo que provocará nuevamente un daño irreversible en el material (Bodig y Jayne 1993).

Por ejemplo, ambos Fridley, *et. al.* (1996) y Deppe y Ruhl (1993) no informan cambios en el rendimiento mecánico de elementos estructurales de madera después de un tiempo de servicio de 85 y 600 años, respectivamente. Por otra parte, los miembros estructurales de los pilares de madera mostraron daños microestructurales y un impacto reducido. resistencia a la flexión y módulo de Young después de solo 30 años de servicio (Kollmann y Schmidt 1962).

Si la carga mecánica se combina con cambios en la humedad relativa del aire y, por lo tanto, en la humedad contenido de madera, se produce un efecto llamado mecanoabsorción. Por ejemplo, carga junto con la desorción da como resultado una deformación que es mayor que la suma de las deformaciones, debido a la pura contracción y carga pura. A pesar de los numerosos estudios realizados en este tema, el fenómeno aún no ha sido completamente aclarado, debido al alto número de influencias factores (diversas condiciones climáticas, magnitud y duración de la carga), (Hunt,1986; Toratti, 1992; Entwistle y Zadoroshnyj ,2008).

Los principales componentes químicos que constituyen las paredes de las células de la madera son celulosa, lignina y hemicelulosas. La celulosa es una macromolécula de carbohidratos que representa el 40-45% en peso de la madera, siendo ligeramente superior en maderas duras que, en maderas blandas, (Kránitz, 2016).

Se construye a partir de unidades de β -D-glucosa enlazadas juntos por enlaces 1-4, el grado medio de polimerización varía de 8000 a 10000. En la macromolécula de celulosa es lineal como resultado de la disposición de los enlaces. En su estado nativo, las moléculas de celulosa están dispuestas en una red cristalina debido a enlaces de H intermoleculares y fuerzas van der Waals, formando microfibrillas. Una microfibrilla de celulosa tiene partes cristalinas y no cristalinas (amorfos). Las microfibrillas se organizan además en elementos estructurales más grandes, llamados fibrillas (Fengel y Wegener 1989; Ghavidel; 2020).

Debido a los fuertes enlaces covalentes y de hidrógeno dentro y entre las moléculas de celulosa, la celulosa las fibrillas pueden resistir altas tensiones de tracción. La cristalinidad es un atributo importante de la celulosa, que tiene un efecto significativo sobre sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Por ejemplo, al aumentar cristalinidad, resistencia a la tracción, estabilidad dimensional y densidad aumentan, mientras que propiedades como la reactividad química y la hinchazón disminuyen 500 μm 500 μm 500 μm (Andersson, 2003, Schenzel, 2005; Agarwal, 2010). Según la literatura, el 60-70% de la celulosa de la madera es cristalina (Stamm 1964; Fengel y Wegener 1989; Hedges 1989).

La lignina es un polímero ramificado polifenólico que asciende a aproximadamente 20% y 30% en maderas duras y maderas blandas, respectivamente. Tiene una estructura amorfa heterogénea construida a partir de una combinación de tres unidades de fenilpropano: alcohol p-cumarílico (o p-hidroxifenilo), alcohol sinapílico (siringilo) y alcohol de coniferilo (guaiacilo). La composición de la lignina varía según la especie de madera y también muestra una diferencia entre maderas blandas y maderas duras.

La hemicelulosa es un término colectivo para los componentes de carbohidratos de la madera distintos de la celulosa. Eso incluye una amplia variedad de compuestos formados por varias unidades de azúcar, siendo sus características comunes cadenas ramificadas que son mucho más cortas que las de la celulosa. Los tipos de hemicelulosas presentes varían mucho para las maderas blandas y duras, así como entre las especies. Los compuestos más comunes son xilosa y manosa, para maderas duras y blandas, respectivamente. Las hemicelulosas representan 20-30% de la masa de tejido y proporcionan la conexión entre las fibras de celulosa y la lignina debido a los enlaces de H (Fengel y Wegener 1989).

El contenido de cenizas de la madera suele rondar el 0.5%, compuesto por diversas sustancias minerales de las que algunos juegan un papel esencial en el proceso de crecimiento. El contenido inorgánico de la madera es muy influenciado por las condiciones ambientales (Zobel y van Buijtenen 1989).

Cavalli (2016) menciona que la variación de las propiedades mecánicas de la madera debido al envejecimiento es una consecuencia del cambio en la microestructura de la madera. Informaron una disminución en la cantidad de "materiales celulósicos", atribuyendo la mayor rigidez de la madera envejecida a la cristalinidad de la celulosa, observando un incremento en la cristalinidad durante los primeros 100 años, seguido de una disminución progresiva.

La composición química de la madera de los pinos mexicanos se ha estudiado para pocas especies. En 2001 Rutiaga estimó en madera de albura y duramen de *P. pseudostrobus* la solubilidad en éter de petróleo (0.7% y 4.4%), acetona (0.7% y 2.8%), metanol (0.8% y 0.8%), agua fría (1.0% y 3.7%) y agua caliente (1.2% y 1.5%); el contenido de polisacáridos (67.8% y 67.2%), de lignina Runkel (26.6% y 27.6%) y de cenizas (0.16% y 0.08%), además de identificar los elementos presentes en estas últimas.

Ávila (2011) estudió que los componentes químicos de la madera de *P. pringlei* sana e infectada por muérdago *Psittacanthus macrantherus*. Contienen sustancias inorgánicas (0.34%), de extraíbles solubles en etanol ciclohexano (0.83%), de extraíbles solubles en agua fría (3.62%) y de holocelulosa (63.58%) resultaron ser mayores en madera sana que en madera plagada (0.31%, 0.67%, 3.09% y 42.82% respectivamente); por el contrario, la madera infectada presentó valores más altos de solubilidad en sosa (9.87%), de extraíbles solubles en agua caliente (6.22%) y de lignina (28.50%) en relación con la madera sana (8.46%, 5.29% y 23.56% respectivamente).

Ravilla (2011) estudió algunos aspectos de la química de la madera de *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*, cuantificando pH (4.09 – 5.63), cenizas (< 0.6%) de las que 90% fueron potasio, calcio y magnesio, contenidos de extraíbles altos especialmente en el duramen; bajo contenido de celulosa (35.5% - 37.9% determinado por hidrólisis de carbohidratos y 34.8% - 37.1% determinado por deslignificación), alto contenido de lignina (28.8% - 31.5% y 3.6% - 36.4%) y alto contenido de hemicelulosas (29.4% - 32.2% y 28.8% - 30.3%), determinó además las hemicelulosas presentes (glucomanana 15.6% - 20.6% y glucuronoxilana 7.2% - 10 %).

Dada la poca información que se tiene de los componentes químicos de las maderas mexicanas de pino, son necesarios estudios que, además de aportar elementos para su mejor aprovechamiento, permitan establecer interrelaciones con propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas de este valioso recurso, (Bernabé, *et al*, 2013) La menor cantidad de extraíbles se obtuvo con ciclohexano en un intervalo de 1.03% a 1.33% (P=0.0581), seguido de los obtenidos con agua caliente, metanol y acetona, se encontró diferencias significativas en el contenido de extraíbles solubles en acetona y metanol presentes en el duramen y los que contiene la albura, (Ávila, *et. al.*, 2014).

Es conocido que los extraíbles del duramen y la corteza pueden presentar alta resistencia al biodeterioro; a este respecto se ha encontrado que el extracto metanólico de corteza de Brasil es inhibidor de bacterias y levaduras, en él se ha identificado hematoxilina, brasilina y ácido gálico como los mayores inhibidores de estos agentes biológicos (Rivero, 2008).

Los contenidos de holocelulosa determinados en madera se encuentran en el intervalo publicado para las especies tropicales (49.2% a 82%) (Rowell, 1984; Rutiaga *et al.*, 2010); mientras que el contenido de holocelulosa en diferentes cortezas es inferior al intervalo encontrado por Fengel y Wegener (1989) que varía de 51.6% a 83.4%. Ghavidel; (2020) consideró que los ejemplares de abeto de su investigación tenían solo 120 años, solo se pueden ver pequeñas diferencias con su contraparte de muestra reciente, de manera similar a las muestras de abeto. Por tanto, también es posible que los procesos de degradación sean bastante lentos en los primeros 120 años y los cambios son demasiado pequeños para ser detectados por los métodos químicos húmedos utilizados. Las tendencias observadas relacionadas con los compuestos químicos concuerdan bien con la literatura y los resultados de cristalinidad corresponden a la teoría de Kohara y Okamoto (1955).

Las cenizas de madera son los restos orgánicos e inorgánicos de la madera quemada o las fibras de madera blanqueada. Las propiedades químicas y físicas de la ceniza de madera difieren considerablemente dependiendo de muchos factores. Los árboles de madera dura como el arce, roble y nogal americano generalmente producen más ceniza que los árboles de coníferas como el pino, y el cedro. La corteza y las hojas de los árboles normalmente producen más ceniza que las partes interiores de la madera del árbol. Por lo general, la quema de madera se traduce en un 6 a 10 por ciento de cenizas. El reciclaje de la ceniza de madera tiene muchos beneficios para los jardines, las plantas y los cultivos. (Hedges, 1990).

El resultado del microanálisis de las cenizas, mediante rayos X, indica que los elementos encontrados en mayor proporción son calcio, potasio y magnesio, estos elementos son los principales componentes de las sustancias inorgánicas en la madera (Fengel y Wegener, 1989), también reportados en otros pinos mexicanos en ese orden de importancia (Rutiaga, 2001; Revilla, 2011) y mayor proporción de magnesio que potasio en *P. pringlei* (Ávila, 2011).

Los contenidos de los principales componentes químicos varían de 4,0 a 4,4 para el pH; 0,3% de cenizas con mayor presencia de calcio, potasio y magnesio; de 17,9% a 25,4% de solubilidad a la sosa; de 7,6% a 8,2% de extraíbles totales, en la extracción secuencial la mayor solubilidad se presentó con agua caliente, y en proporciones similares fue para ciclohexano, acetona y metanol; de 68,1% a 74,7% de holocelulosa, de 24,0% a 28,5% de lignina (Bernabé, 2013).

6.14. Ultrasonido

El ultrasonido es una rama de la acústica que trata con la generación y uso de (generalmente) ondas acústicas inaudibles. Hay dos amplias áreas de uso, llamadas aplicaciones de baja y alta frecuencia. En las aplicaciones de baja frecuencia, la intención es transmitir información alrededor o a través de un sistema, mientras que, en las aplicaciones de alta frecuencia, la intención es permanentemente alterar un sistema (Krautkramer, 1990).

Una estructura a nivel microscópico es de interés solo si es afectada por las propiedades macroscópicas del medio. Cuando las partículas del medio son desplazadas desde su posición de equilibrio, surgen fuerzas internas y se restauran. Esta restauración de fuerzas entre partículas, combinadas con la inercia de las partículas, da como resultado la dirección para el movimiento ondulatorio del medio (Krautkramer, 1990).

6.14.1. Ondas Ultrasónicas

Las ondas Ultrasónicas son representadas como movimientos ondulatorios y requieren como condición esencial para su existencia de algún medio donde su transmisión sea posible. Los medios en los que las ondas ultrasónicas pueden desplazarse deben contar con elasticidad, de aquí que los medios posibles a utilizar por las ondas son, Sólidos y Líquidos.

Hay tres tipos básicos de ondas que pueden existir en un medio (sólido, líquido o gas), esto dependiendo del medio en el cual se transmiten y dependiendo de la naturaleza de sus límites. Los tipos de ondas son: Onda longitudinal, Onda transversal y Onda superficial. La velocidad de propagación depende del medio en el cual se trasmite, y puede estar en el rango de 102 m/s a 104 m/s (Nagy, 1999). A continuación, se dará una breve definición de cada una de ellas.

6.14.1.1. Onda Longitudinal (Onda Dilatacional).

Es la onda ultrasónica más ampliamente usada en la inspección de materiales ya que se puede transmitir en cualquier medio (sólido, líquido o gas). El sonido es un ejemplo de una onda longitudinal. En la figura 6.18 se muestra un ejemplo de una onda longitudinal (Krautkramer, 1990).

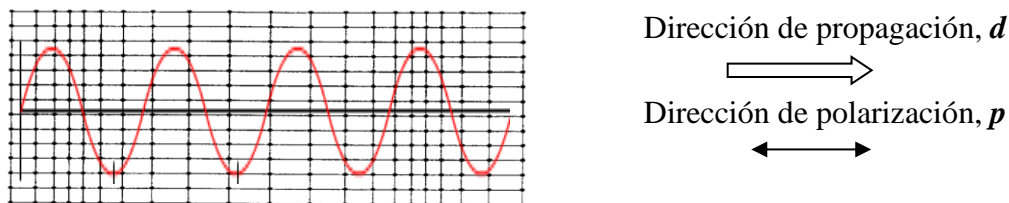


Figura 6.18. Forma de propagación de la onda longitudinal.

6.14.1.2. Ondas Transversales (Ondas Cortantes).

También este tipo de ondas son ampliamente usadas en la inspección y caracterización de materiales. Las ondas transversales son aquellas en las que el movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de la propagación. Una onda transversal es ilustrada esquemáticamente en la figura 6.19.

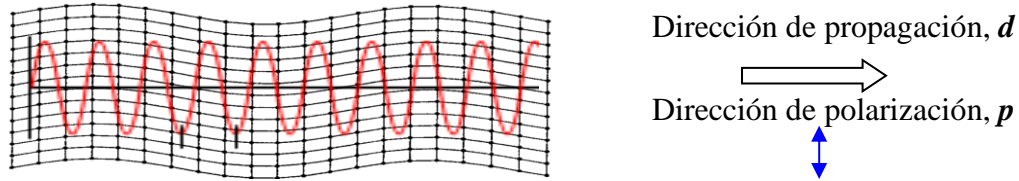


Figura 6.19. Forma de propagación de las Ondas Transversales

6.15. Tipos de ondas en sólidos y fluidos.

Solamente un número muy reducido de tipos de ondas pueden ser generadas en un medio continuo. En el caso de un medio líquido, solamente la onda longitudinal (dilatación) puede existir, mientras que, en un medio sólido, ambas tanto la onda longitudinal como la onda transversal pueden ser transmitidas. Sin embargo, la existencia de una superficie libre en un medio sólido trae la posibilidad de generar ondas superficiales (Rayleigh). La naturaleza básica de estos tres tipos de ondas ha sido reportada y mostradas en las siguientes ecuaciones, de manera general, la ecuación de la onda acústica es representada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{Ecuación 10. Onda acústica.}$$

Donde u representa el desplazamiento de la onda o pulso en una dirección de polarización arbitraria y c es la velocidad de fase que puede ser determinada por medio de la siguiente expresión:

$$C = \sqrt{\frac{\text{rigidez}}{\text{densidad}}} \quad \text{Ecuación 11. Velocidad de fase.}$$

También puede ser mostrado que la velocidad de las ondas longitudinales (C_l) y transversales (C_t) respectivamente están dadas por:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{Ecuación 12. Velocidad de las ondas longitudinales.}$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Ecuación 13. Velocidad de las ondas transversales.}$$

Donde E es el módulo de elasticidad (módulo de Young), ν es la relación de Poisson, ρ es la densidad y G es el módulo de corte (módulo de rigidez).

Unidades físicas de las ondas y constantes elásticas de los materiales. Para facilitar la interpretación de las fórmulas se anexa la Tabla 6.5, la cual nos muestra las expresiones más frecuentemente usadas en ultrasonido y sus símbolos

Tabla 6.5. Unidades, Simbología y Constantes Elásticas de las Ondas Ultrasónicas

Símbolos	Constante elástica	Unidades
ω	Frecuencia angular	Rad / s
f	Frecuencia	Hz = s-1
λ	Longitud de onda	m
ξ	Desplazamiento de la partícula	m
c	Velocidad del sonido	m/s
v	Velocidad de la partícula	m/s
ρ	Densidad	kg/m ³
p	Presión sonora	Pa = N/m ²
Z	Impedancia acústica	N/m ²
P	Potencia Acústica	W
J	Intensidad de la potencia acústica	W/m ²

6.16. Velocidad ultrasónica

Las ondas ultrasónicas han sido ampliamente utilizadas para la caracterización de materiales y para el monitoreo (control) de procesos en los materiales. Las ondas como se mencionó producen pequeñas amplitudes de vibraciones mecánicas y, dependiendo del modo utilizado, pueden ser inducidos esfuerzos longitudinales o de corte en un medio sólido. La información de las propiedades estructurales en un medio puede ser determinada por medio de la medición de la velocidad y atenuación ultrasónica.

La velocidad de fase de la onda ultrasónica depende de las constantes elásticas y densidad del medio en las que se propague mientras que la atenuación depende de la microestructura y defectos cristalinos (ultrasound, 2001). Es comúnmente aceptado que la velocidad ultrasónica está directamente relacionada con los parámetros elásticos ya que las ondas ultrasónicas generan oscilaciones mecánicas. Métodos basados en la velocidad ultrasónica son ampliamente utilizados para investigar el comportamiento elástico de materiales ingenieriles incluyendo la madera (Kránitz, 2013).

La madera es considerada un material ortotrópico es decir que su matriz de rigidez tiene 9 coeficientes elásticos independientes. Cuando se aplica las técnicas de ultrasonido para determinar los parámetros elásticos tales como módulo de Young, módulo de corte. Las velocidades tienen que ser medidas en los ejes orto trópicos y a varios ángulos (Vazquez, 2015).

Esta metodología es bastante compleja y requiere una minuciosa preparación de las probetas. En práctica, solamente las principales direcciones orto trópicas son medidas por lo cual los valores de rigidez diagonales son calculados por la siguiente ecuación:

$$R_{ii} = C_{ii}^2 \cdot \rho \quad \text{Ecuación 14. Valores de rigidez diagonales.}$$

Donde R_{ii} es la rigidez, C_{ii} es la velocidad ultrasónica longitudinal de la onda y ρ es la densidad. Una simplificación común utilizada en el campo de ingeniería de la madera es aproximar el módulo de Young a los valores de rigidez de tal manera que:

$$E_{ii} \approx R_{ii} \quad \text{Ecuación 15. Aproximación del módulo de Young a los valores de rigidez.}$$

De manera similar el módulo de corte puede ser calculado ultrasónicamente basado en la siguiente expresión.

$$G_{ij} = C_{ij}^2 \cdot \rho \quad \text{Ecuación 16. Módulo de Corte.}$$

Donde G_{ij} es el módulo de corte, C_{ij} es la velocidad ultrasónica corte de la onda y ρ es la densidad. Esto puede ser considerado solamente como una aproximación ya que la influencia de las relaciones de Poisson es ignorada.

6.17. Atenuación ultrasónica

Las mediciones de atenuación son el pivote para establecer las correlaciones entre la microestructura y las propiedades mecánicas. Las caracterizaciones correctas de propiedades mecánicas dependerán de las mediciones precisas de la atenuación. Esta pérdida es definida como la relación entre dos amplitudes, y se expresa generalmente en unidades logarítmicas ya sea en Nepper (N_p) o Decibels (Db) que están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente: (He, 1998).

En algunos casos, la pérdida L ocurre localmente como el resultado de la interacción de la onda acústica con la discontinuidad y microestructura del material. Estos son, por ejemplo, pérdidas por reflexión y transmisión en una interfase (He, 1998). La atenuación ultrasónica es la tasa de decaimiento de la radiación mecánica en la frecuencia ultrasónica que se propaga a través de un medio debido en nuestro caso a la interacción existente de la onda con los defectos naturales y degradación de la madera. Se realizaron mediciones experimentales del coeficiente de atenuación en las diferentes probetas de madera empleando la técnica ultrasónica de emisión-transmisión con ondas longitudinales y transversales por medio de la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{20}{d} \log \frac{A_2}{A_1} \quad \text{Ecuación 17. Coeficiente de atenuación.}$$

Donde A_1 es la amplitud de la señal sin atenuación y A_2 es la amplitud de la señal atenuada, d es la distancia de propagación y α es el coeficiente de atenuación.

Para la determinación de la velocidad ultrasónica se utilizará el método pulso-eco, en el cual un transductor genera un pulso ultrasónico y recibe su “eco”. El transductor funciona a la vez como transmisor y receptor de la señal (eco) ultrasónica dentro del material. El pulso ultrasónico viaja a través del espécimen a inspeccionar y se refleja en la cara posterior del mismo. Posteriormente, el transductor recibe la reflexión de los ecos, mientras que el pulso ultrasónico se mantiene reflejándose en la pared posterior del espécimen atenuándose con respecto del tiempo (Krautkramer, 1990).

El tiempo entre dos ecos es la longitud de tiempo requerida para que el pulso viaje a través del espécimen y regrese al transductor. Mientras que la atenuación ultrasónica (amplitud) decae exponencialmente con el tiempo. (ultrasound, 2001) La velocidad del sonido en un sólido puede ser calculada por la siguiente formula: El factor 2 en la ecuación 6 aparece debido a que la onda ultrasónica debe atravesar el espesor del espécimen dos veces (ida-vuelta) antes de regresar al transductor. Para lograr la mayor exactitud posible en la medición de la velocidad ultrasónica c , tanto el espesor del espécimen material d como Δt deben ser medidos con exactitud y corregidos por errores sistemáticos.

Para ello, el espécimen debe ser cuidadosamente maquinado para tener superficies lisas, planas y paralelas. La exactitud de las mediciones de Δt pueden ser mejorada considerablemente por la medición del intervalo de tiempo de manera precisa para ello se utiliza el método de ventaneo de las señales (ver figura 6.20) (Matikas, 1996).

Ecuación 18. Velocidad de propagación en el material.

$$c = \frac{2d}{\Delta t}$$

Donde: c = velocidad de propagación en el material

d = distancia de propagación (espesor del espécimen)

Δt = tiempo entre ecos (ida-vuelta) adyacentes

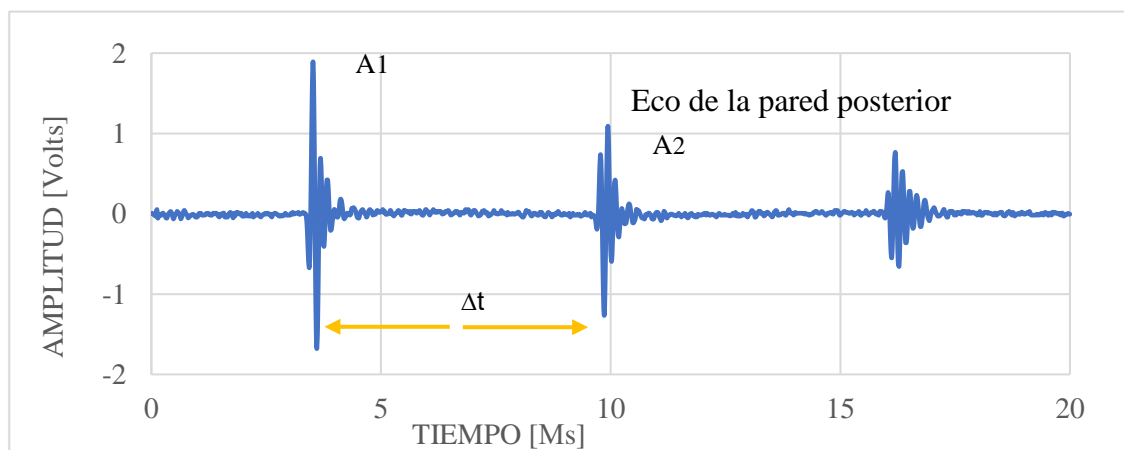


Figura 6.20. Tren de Ecos recibidos por la pared posterior del espécimen.

6.17.1. La Atenuación Ultrasonica y Microestructura

El ultrasonido tiene un gran potencial de aplicación en la caracterización de microestructura, esto incluye la medición del tamaño de grano, textura, recristalización y porosidades. (Nagy, 1999). La atenuación ultrasónica es fundamental para establecer correlaciones entre la microestructura y propiedades mecánicas. La absorción y la dispersión son los mecanismos que gobiernan la atenuación ultrasónica en el rango de frecuencia. Existen otras pérdidas asociadas con métodos para la medición de la atenuación, las cuales no son inherentes a la microestructura (Nagy, 1999).

Basterra (2006) habla sobre la determinación microscópica de la especie y la inspección visual inicial a nivel macroscópico que permite conocer distintas características de la madera, como porosidad, tipo de radios, anillos de crecimiento, parénquima, etc. En el caso de las coníferas donde dada la gran semejanza interespecífica es necesario proceder a un análisis microscópico.

Existen otro tipo de pérdidas las cuales ocurren sobre una distancia determinada en la cual la onda ultrasónica se propaga, pero no necesariamente proporcional a la distancia recorrida por la onda ultrasónica, tales pérdidas son usualmente asociadas con la divergencia o apertura del haz ultrasónico. Cuando se habla acerca de la atenuación de un medio, limitamos el concepto de dicho parámetro a un fenómeno el cual causa pérdidas proporcionalmente a la distancia de propagación (Nagy, 1999). La pérdida total de la atenuación a través de un medio puede ser expresada como:

$$L = \alpha d$$

Ecuación 19. Pérdida total de la atenuación.

Donde d es la distancia de propagación y α es el coeficiente de atenuación.

La dispersión y absorción son los mecanismos de pérdida de energía que gobiernan la atenuación ultrasónica en los rangos de frecuencias de interés para la caracterización de la mayoría de los sólidos. Existen otros tipos de pérdidas de energía que están asociadas con los métodos de la medición de la atenuación, estas pérdidas son asociadas con la divergencia o apertura del haz ultrasónico las cuales no son inherentes a la microestructura del material. Estos tipos de pérdidas pueden ser eliminados para las mediciones de atenuación por medio de procedimientos experimentales y reducción de datos con el propósito de obtener el verdadero coeficiente de atenuación como una función de la frecuencia (He, 1998).

La absorción convierte la energía acústica en calor vía viscosidad, conducción térmica, histéresis elástica, etc. La energía absorbida es una pérdida irreversible del campo acústico ya que se disipa en el medio. Mientras que la dispersión convierte la energía del haz colimado

coherente en uno incoherente, las ondas divergentes son el resultado de la interacción de la onda con las inhomogeneidades en el material. La energía dispersada lleva por la onda acústica incoherente no es necesariamente una pérdida ya que parte de esta puede ser recogida por el mismo transductor ultrasónico utilizado para recibir la onda coherente (Nagy, 1999).

$$\alpha = \alpha_{absorción} + \alpha_{dispersion}$$

Ecuación 20. Coeficiente de atenuación.

6.18. Birrefringencia

La birrefringencia es una propiedad exhibida por ciertos tipos de estructuras cristalinas en el que un rayo de luz que pasa a través del material y se rompe en dos ondas desiguales que puedan pasar a través del material a diferentes velocidades. Esta propiedad es también conocida como la doble refracción (Muncaster, 1993; Lipson, 1995).

Esta propiedad se exhibe cuando un material se dice que es anisotrópico, significa que sus propiedades pueden variar dependiendo de la dirección de la medición. En el ejemplo anterior con un bloque de cristal birrefringente colocado en la parte superior de un trozo de papel con un punto, ya que el papel se hace girar, uno de los puntos se moverá, debido a que el índice de refracción cambia con el ángulo (Shipman, 2015).

En birrefringencia, se generan dos ondas de luz. La primera es la onda ordinaria, y permanecerá en esa dirección, con la luz que pasa directamente a través del material sin interrupciones. La segunda onda se conoce como la onda extraordinaria, y se mueve como el material se hace girar. La onda extraordinaria rodea la onda ordinaria, el cambio, ya que golpea las diferentes áreas del material y se refracta de forma diferente (Muncaster, 1993).

Esto se debe a la polarización de la onda cambia como el objeto se reorienta. También es posible ver materiales trirefringente, en el que hay tres índices de refracción. En materiales biológicos, indica una ordenación de las moléculas, por ejemplo orientados entre sí, como sucede en un cristal (Singh, 2015).

Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí. Este fenómeno sólo puede ocurrir si la estructura del material es anisótropa. Si el material tiene un solo eje de anisotropía, (es decir es uniaxial), la birrefringencia puede describirse asignando dos índices de refracción diferentes al material para las distintas polarizaciones (Shipman, 2015).

La birrefringencia de flujo o de corriente es la que se observa únicamente cuando la sustancia se encuentra en solución de moléculas grandes, como por ejemplo nucleoproteínas.

- La birrefringencia cristalina o intrínseca es la que ocurre en sistemas en los que los enlaces entre las moléculas o iones presentan una disposición regular simétrica; es independiente del índice de refracción del medio (Avadhanulu, 1992).
- La birrefringencia de forma es la que se origina por la orientación regular de partículas submicroscópicas asimétricas en una sustancia u objeto, difiriendo del índice de refracción del medio circundante; es la forma más frecuente encontrada en seres vivos (Desmarais, 1997).

La birrefringencia de tensión es la observada ocasionalmente en estructuras isótropas cuando son sometidas a tensión o presión; ocurre en los tejidos muscular y embrionario, en materiales translúcidos y explica el efecto fotoelástico, ver figura 6.21.

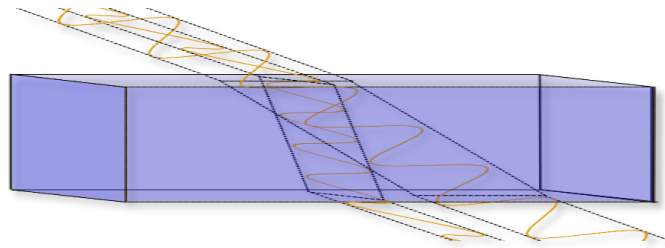


Figura 6. 21. Desplazamiento de los rayos de luz con polarización perpendicular a través de un material birrefringente.

6.18.1. Medición de la Birrefringencia.

Una de las técnicas ultrasónicas prometedoras, basada en los cambios de velocidad de la onda de corte, es la medición de la birrefringencia acústica B . Este parámetro puede medirse en material compuesto como la madera, con ondas de corte propagándose en la dirección del espesor y polarizadas en dos direcciones ortogonales que son eje acústico de un material bajo investigación. El valor de birrefringencia se calcula a partir de:

$$B = \frac{C_{12} - C_{13}}{C_{12} + C_{13}/2} = \frac{t_{12} - t_{13}}{t_{12} + t_{13}/2} \quad \text{Ecuación 21. Obtención de la birrefringencia acústica.}$$

Donde C_{12} , C_{13} son las velocidades transversales (m / s) que se propagan en la dirección 1 y polarizadas en las direcciones 2 y 3, respectivamente (m / s) y t_{12} , t_{13} son los tiempos de vuelo de la onda de corte se propaga en la dirección 1 y se polariza en las direcciones 2 y 3, respectivamente (Rede, 2017).

6.19. Microscopia Electrónica de Barrido

El Microscopio Electrónico de Barrido es una herramienta muy importante en la ciencia de materiales y en la ingeniería; se utiliza para medir las características microscópicas, la clasificación de las fracturas, los estudios de la microestructura, las evaluaciones de los

recubrimientos de poco espesor, el examen de la contaminación de la superficie y el análisis de fallas en los materiales (Smith, 2006).

En contraposición a la microscopia óptica en la cual la superficie es expuesta a la luz visible incidente, el microscopio electrónico de barrido dirige un haz de electrones enfocado a un punto de la superficie de una muestra a analizar, recoge y muestra las señales electrónicas emitidas por la muestra (Carlos, 2009). La resolución de la mayoría de los instrumentos es de alrededor de 5 nm, con un amplio intervalo de amplificación (entre 15 a 100 000 \times). En las figura 6.22 podemos observar el microscopio electrónico de exploración de emisión de campo JEOL JSPM-5200, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el cual se empleó para la obtención de imágenes de muestras del material estudiado en este trabajo (Smith, 2006).



Figura 6.22. Microscopio electrónico de barrido.

El Microscopio Electrónico de Barrido es particularmente útil en análisis de materiales y para la observación de superficies fracturadas de los metales. Las fotografías hechas por el Microscopio Electrónico de Barrido se utilizan para determinar cuándo una superficie fracturada es intergranular (a lo largo del límite de grano), transgranular (a través del límite de grano), o una mezcla de ambas (Carlos, 2009).

Las muestras que se analizan empleando el Microscopio Electrónico de Barrido normal suelen estar recubiertas de oro u otros metales pesados para lograr una mejor resolución y calidad de la señal. Esto es de particular importancia si la muestra está compuesta por un material no conductor. También puede obtenerse información cualitativa y cuantitativa en relación con la composición de la muestra cuando el Microscopio Electrónico de Barrido está equipado con un espectrómetro de rayos X (Smith, 2006).

7. Antecedentes

La caracterización ultrasónica de materiales es la aplicación más importante del ultrasonido en cualquier campo de la Ingeniería. Originalmente, las pruebas ultrasónicas de materiales se utilizaban casi exclusivamente para detectar discontinuidades macroscópicas, en estructuras metálicas después de que habían estado en servicio durante un tiempo, hoy en día también al ser fabricadas para determinar la calidad de las mismas, como podemos ver a continuación.

7.1. La utilización de Técnicas de Ultrasonido en la conservación de las estructuras históricas

Estas técnicas ofrece entre sus múltiples beneficios su portabilidad ya que hay que tener en cuenta las limitaciones que se derivan de las condiciones de acceso y la visibilidad de la superficie de los elementos de la madera (Calicchio, 2009).

La utilización de ondas ultrasónicas para la realización de ensayos no destructivos está muy extendida en el estudio de materiales (metales, hormigón, materiales compuestos, etc.) (Rodríguez, 1995).

Las técnicas ultrasónicas juegan un papel muy importante en estos desarrollos, debido a su versatilidad para la evaluación de micro estructuras, las cuales están asociadas a las propiedades mecánicas, así como también a la detección microscópica y macroscópica de discontinuidades en los materiales. La técnica la señal recibida por el material y de esta manera definir e interpretar la presencia y localización de defectos y discontinuidades en los materiales (Popp, 1990; Boudas, 2003; He, 1998).

La mayoría de los instrumentos de la inspección ultrasónica detectan defectos por medio del monitoreo de uno o más de los siguientes aspectos:

- El tiempo que tarda en pasar la onda ultrasónica a través de la probeta desde el punto de entrada del transductor hasta el punto de salida del transductor (velocidad ultrasónica).
- La atenuación de las ondas ultrasónicas por absorción y dispersión dentro de la probeta (atenuación ultrasónica).
- Rasgos en la respuesta espectral para cada una de las señales transmitidas o reflejadas.

La técnica ultrasónica es uno de los métodos de inspección no destructivos mas ampliamente utilizados debido a la versatilidad que presenta tanto para la caracterización como detección de defectos e imperfecciones en los materiales.

Las principales ventajas de la técnica de inspección ultrasónica comparados con otros métodos para la inspección no destructiva en materiales son:

Alta sensibilidad, permitiendo la detección de defectos extremadamente pequeños, solo se necesita una superficie para ser accesible, es portátil, proporciona un gran rendimiento al ser procesado digitalmente a una computadora para la caracterización de defectos y propiedades de los materiales (Chen, 2013).

7.2. Utilización de Técnicas de Ultrasonido en la madera

Carballo (2009) cita a (Íñiguez, 2007) respecto a la técnica de ultrasonido menciona las múltiples aplicaciones potenciales que abarcan desde el árbol en pie hasta cualquier elemento estructural en servicio. Sin embargo, en España la investigación se ha centrado en ensayos de laboratorio con medidas directas e indirectas sobre las coníferas de uso estructural de procedencia española, con el objetivo de clasificar el material o conocer un valor de referencia para la inspección en estructuras. En el caso de las inspecciones, las velocidades de ultrasonidos se analizan de manera conjunta con evaluaciones visuales u otras técnicas puntuales para conocer la densidad o el estado interior del material.

Rodríguez (1995) destaca los trabajos de Arriaga y Argües en España relativos a normativas de cálculo de madera aserrada y encolada y en sus investigaciones de evaluación de forjados antiguos de madera mediante la técnica de ultrasonidos. Así como los trabajos realizados por Palaia y Galvañan sobre la aplicación de los ultrasonidos a la determinación de los estados de deterioro. Sus investigaciones están basadas en el análisis de las señales de un osciloscopio incorporado al aparato de ultrasonidos.

Existen datos de investigaciones sobre la velocidad de paso de una onda ultrasónica a través del material, y esta información ha sido publicada en tesis, memorias de proyectos, comunicaciones a congresos y artículos. Sin embargo, los resultados se presentan de manera diferente y en ocasiones no se conoce la desviación estándar del material, o el valor medio de la velocidad de la onda, o el valor de la densidad del material para calcular el módulo de elasticidad. Sería necesario la creación de una base de datos que defina la información mínima necesaria, así los resultados de futuras investigaciones se podrían comparar entre sí. (Carballo, 2009).

En Chile se han estudiado y evaluado algunas propiedades físico-mecánicas de maderas nativas chilenas de plantación por medio de ultrasonido y se compararon con ensayos mecánicos tradicionales de flexión. Las maderas seleccionadas fueron cuatro latifoliadas: tepa (*Laureliopsis philipiana*), olivillo (*Aextoxicon punctatum*), laurel (*Laurelia sempervirens*) y lenga (*Nothofagus*

pumilio), y dos coníferas: alerce (*Fitzroya cupressoides*) y mañío (*Podocarpus nubigena*). Se utilizaron los equipos de ultrasonido Steinkamp BP5 y Panametric Epoch XT (Baradit, 2013).

McGovern (2001), dice que utilizo muestras de forma cubica de pino *Loblolly pine* (*Pinus taeda*) las cuales se expusieron al hongo *Gloeophyllum* (*Globeophyllum trabeum*) durante periodos de tiempo que fueron de una semana a doce semanas. Utilizando la tomografía computarizada de rayos X (TC) calculó la pérdida de masa correspondiente a las muestras debido a la descomposición y las densidades correspondientes. En su trabajo indica como para cada una de las tres direcciones principales del material de estas muestras con decaimiento controlado, presento las mediciones de velocidad de cizallamiento ultrasónico longitudinal y (polarizado) junto con las mediciones de atenuación correspondientes. La cantidad de descomposición (es decir, pérdida de masa) se evaluó a continuación usando el Método de prueba estándar de ASTM para conservantes de madera mediante cultivos de bloque de suelo de laboratorio (norma ASTM D1413-99).

McGovern (2001) en la Figura 7.1 nos muestra los tres planos principales del material y las velocidades asociadas, incluida la diferente polarización de las ondas de corte. Durante el proceso de disminución de control, las muestras de madera con una dimensión nominal de 1 pulgada (2.54 cm) tuvieron una reducción de volumen. Las muestras expuestas a doce semanas de descomposición tenían una pérdida de volumen de ~ 30% y la dimensión de la sección transversal más pequeña medida era aproximadamente de 0.57 pulgadas (~ 14.5 mm).

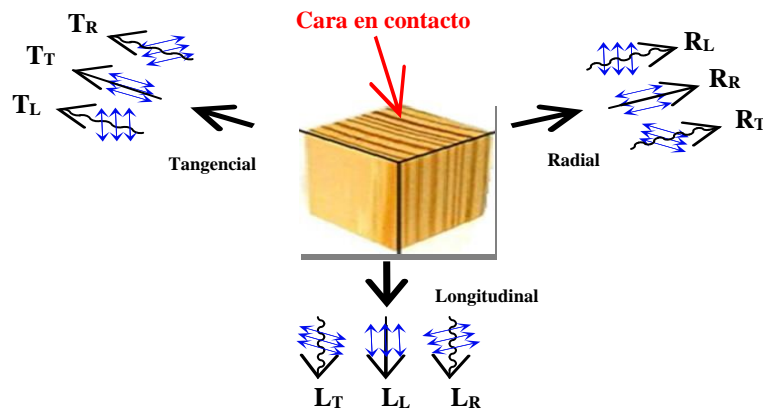


Figura 7.23. Asignación de referencias de coordenadas para los especímenes de cubos de madera. Obsérvese la onda longitudinal y las dos ondas de corte asociadas con cada una de las tres direcciones ortogonales, es decir, las direcciones principales del material. Asignación de referencias de coordenadas para los especímenes de cubos de madera. Obsérvese la onda longitudinal y las dos ondas de corte asociadas con cada una de las tres direcciones ortogonales, es decir, las direcciones principales del material. McGovern (2001).

Aplicación a las experiencias de monumentos históricos Gracias a la tecnología Sylvatest-Duo, los expertos de CBS-CBT pudieron haber manejado algunas experiencias importantes alrededor del mundo en algunas de las principales construcciones históricas de madera. La Ciudad Prohibida, Beijing, China Con la colaboración de la Universidad Tsinghua de Beijing, CBS-CBT tuvo que evaluar la resistencia residual de las columnas de madera del templo principal de la Ciudad Prohibida para detectar si se debe aplicar una renovación o no. Las columnas de madera están compuestas por cuatro cuartos de cilindro (Sandoz, 2006).

Castillo de Valere, Sion, Suiza. Le Château de Valère (el castillo de Valere), construido en el siglo XIII en Sion, Suiza, fue inspeccionado en 2001 para definir las obras de renovación que se planearon para la instalación de una biblioteca y un museo para los visitantes. El objetivo de esta experiencia fue la inspección de vigas de madera para obtener la calidad global de cada piso. Por lo tanto, cada viga de madera se midió individualmente mediante la tecnología Sylvatest-Duo con la medición longitudinal para evaluar la resistencia residual de la madera. Con los resultados, podría haberse dibujado un monitoreo para presentar la calidad de cada viga de madera con un color especial dependiendo de la clase de resistencia definida por los estándares. Gracias a este monitoreo, los arquitectos e ingenieros tenían exactamente el estado de las propiedades mecánicas de cada losa y podían administrar sus trabajos con costos optimizados (Sandoz, 2006).

7.3. La noción actual de Patrimonio Monumental

Los conceptos que delimitan lo que se puede considerar como patrimonio ha ido evolucionando a través del tiempo en relación con el desarrollo y los cambios de las corrientes pensamiento de las sociedades. La transformación de la sociedad trajo consigo también la evolución de la noción de monumento histórico, dejando atrás el sentido puramente esteticista, la consideración individualista y la visión sacralizada que los historiadores del arte y la arqueología la asignaron en el siglo XIX y principios del XX, hasta construir el concepto de patrimonio monumental (Hiriart, 2013).

“La validez del término Patrimonio Monumental frente a la de Monumento Histórico yace en la valoración del conjunto, del hecho arquitectónico menos grandioso, pero más social, fortaleciendo sus nuevos significados frente a la sociedad y el desarrollo por su valor de uso y manejo al vincularse a actividades educativas, de interpretación, de ocio y recreación, entre las cuales se ha destacado el turismo cultural” (Hiriart, 2013, pp. 64-87).

El uso del término Patrimonio Monumental para definir indistintamente a monumentos históricos inmuebles, arquitectura vernácula, conjuntos urbanos monumentales, centros históricos o poblaciones rurales tradicionales se centra en la apertura que este concepto tiene actualmente al asumir una visión de conjunto (la ciudad como patrimonio monumental) (Hiriart, 2013).

Patrimonium “es un término jurídico de origen en el Derecho romano y en este caso equivalente a un subtipo de patrimonio cultural y colectivo (junto al patrimonio artístico, arquitectónico, arqueológico, cultural, histórico). Relativo a los paisajes construidos, los monumentos, los conjuntos históricos, las tradiciones pasadas y presentes, registrando los procesos de evolución histórica que constituyen las diversas identidades culturales de los lugares (entre ellos especialmente las ciudades) y sus sociedades” (López, 2010).

El patrimonio es la herencia cultural de la humanidad, es la evidencia de un legado histórico materializado. “Los conjuntos históricos y las obras arquitectónicas populares o relevantes nos regresan al pasado nos ayudan a comprenderlo en el presente, motivándonos a interpretar la evolución de sitios y lugares que se edificaron y formaron parte de un contexto particular y que en muchos casos ya no existen o se han transformado, pero permanecen como testimonio de vivencias y formas de vida, como “una amplitud territorial y una integración cultural como pocas veces se ha logrado” (Hiriart, 2013, pp. 64-87).

“Monumento y patrimonio adquieren entonces una dimensión nueva, producto de la diversidad y de la relación de estos bienes culturales con su entorno social, físico y natural. En esta dimensión alcanzada en la actualidad, el patrimonio monumental se revaloriza al vincularse a las diversas actividades de la sociedad que lo utiliza y lo incluye cotidianamente en las formas de vida contemporánea, aumentando su significado para los actores sociales que lo coexisten, lo disfrutan, lo gestionan y administran en las diversas categorías y escalas del espacio en el cual se originaron y se ubican dichos bienes culturales” (Hiriart, 2013, pp. 64-87).

Hiriart (2013) menciona que en el contexto europeo se utiliza como sinónimo de Patrimonio Monumental el término de Patrimonio Arquitectónico. Este concepto que fue definido en Artículo 1º de la Convención para la salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa (Consejo de Europa, 1985, p.2).

“La ampliación del concepto de patrimonio monumental trajo consigo también la preocupación por su conservación frente a los desafíos planteados para su protección, sobre todo en el siglo XX, es por esto por lo que se puede entender mejor su proceso de

evolución con relación a la conformación una la disciplina cuyas normas y técnicas han permitido desarrollar toda una doctrina de protección y conservación de los bienes materiales históricos, que incluye también la práctica de la restauración” (H).

En el contexto latinoamericano, particularmente en México, destacan la investigación de Carlos Chanfón Olmos quien en su libro publicado en 1984 *Fundamentos Teóricos de la Restauración*, logra conjuntar la evolución de los conceptos, además de abordar ampliamente los preceptos y el progreso de la disciplina de la restauración del patrimonio monumental, contribuyendo también a clarificar las ideas teóricas para comprender mejor las corrientes doctrinales acorde a los cambios que prevalecían en el contexto internacional de los años ochenta. Presenta los conceptos de monumento y de patrimonio monumental como nociones inseparables de las ideas de cultura y de valor social, reconociendo que “ni solamente lo extraordinario es monumento, ni absolutamente todo es monumento” (Chanfón, 1996).

El concepto de la “analogía formal” es bien expresado por Capitel (1992 p. 147) en su análisis de otros autores españoles, así menciona que es un medio capaz de conciliar en los procesos de restauración la autenticidad histórica con las intervenciones nuevas o contemporáneas, y propone que las intervenciones de restauración y adecuación no se basen en el modelo histórico, sino que se inspiren en él para crear una integración más conceptual de semejanza formal o interpretativa.

Por otra parte, en una visión vanguardista y más social, el arquitecto catalán Antoni González Moreno-Navarro (1994), en lo que él denomina la restauración objetiva, propone un método de trabajo en el cual las intervenciones en el patrimonio monumental partan de las necesidades del propio objeto cultural y de su entorno humano, buscando soluciones eficaces de manera que la colectividad receptora de ese patrimonio disfrute de los beneficios directamente derivados de esa conservación y puesta en valor.

Hiriart (2013) nos comenta como los criterios de utilización y conservación del patrimonio cultural se vieron influenciados a la luz de los replanteamientos que iniciara la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, así como con el Informe sobre nuestro futuro común (1987-1988) coordinado por Gro Harlem Brundtland y auspiciado por las Naciones Unidas, que popularizó el concepto de desarrollo sostenible y generó toda una política de desarrollo social, evolucionando hasta adquirir una visión más holística “no solamente preocupada en las cuestiones ambientales, sino dando paso a una visión centrada también en la sociedad y la economía y en sus interrelaciones con la cultura, así como la erradicación de la pobreza” (UNESCO, 2001).

Hiriart (2013) nos habla sobre los criterios sobre el desarrollo sostenible se sumaron a las nociones de desarrollo local y desarrollo sustentable en la década de los años noventa, a partir de la H Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro, 1992), se plantearon estrategias y posturas en torno al desarrollo social, la explotación y deterioro de los recursos naturales y el medio ambiente, que han influido en las disciplinas de la conservación y el manejo sustentable de los recursos culturales.

“Es así como se vinculan en una concepción social los principios de la sostenibilidad y el patrimonio monumental, tomando fuerza los criterios sobre el significado que ese patrimonio tiene en la vida presente y la necesidad de incorporar la salvaguarda de los sitios y elementos materiales e inmateriales del patrimonio cultural dentro de las políticas de la planificación territorial y el desarrollo urbano; identificando también el papel que juegan en el marco de vida de la sociedad” (Hiriart, 2013, pp. 88-102).

La conservación del patrimonio es una labor que involucra muchos factores el contar con un dialogo social entre los aspectos políticos, sociales y económicos facilita la operación de renovación y conservación del patrimonio. El definir los nuevos usos que sean los más adecuados social y económicamente de los recursos patrimoniales deben considerar las capacidades y límites reales de este patrimonio.

El patrimonio se considera como un recurso por sí mismo y la demanda que se hace de él se considera como un consumo final, alrededor del cual diversas actividades vinculadas o derivadas de este permiten obtener recursos necesarios para su protección. El establecer los beneficios que pueden derivarse de la gestión de los recursos culturales.

Los posibles beneficios dentro de un manejo equilibrado mediante actividades como el turismo cultural contribuyen a la elevación de las condiciones de vida, al aumento del empleo, de los ingresos, al refuerzo de la identidad local, que produce impactos positivos y contribuye al desarrollo local.

7.4. Panorama actual del empleo de la madera en las edificaciones

Esteban (2007) nos presenta una síntesis para ofrecer una visión general y objetiva del *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*, “en poco tiempo ha sido implantado en España un nuevo marco legislativo y normativo definido por la Ley de Ordenación de la Edificación, el Código Técnico de la Edificación y la Directiva Europea de Productos de la Construcción.”

La entrada en vigor de la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE). Presenta una serie de garantías que deben ser cubiertas con carácter obligatorio por los diferentes agentes que intervienen en el proceso de la edificación como las relacionadas con la calidad de la edificación, en el más amplio sentido del concepto de calidad. Como la seguridad en las estructuras, seguridad contra incendio, seguridad de utilización, salubridad, protección contra el ruido, ahorro de energía, los seguros anual, trienal y decenal (Herrero, *et. al.*, 2007).

Sandoz (2006) cita a (Kollmann y Cote 1984) mencionando que, la seguridad de los edificios visitados y la renovación del patrimonio histórico requieren un conocimiento preciso de los marcos existentes. Los arquitectos e ingenieros deben evaluar la calidad de una estructura para poder planificar su reemplazo, su renovación o, en el mejor de los casos, su conservación. Como material biológico y debido a muchos efectos ambientales, la madera, incluso de una misma especie, tiene una amplia gama de propiedades mecánicas.

El primer punto para considerar en una inspección para el diagnóstico de una estructura es la identificación de las especies de madera que la componen. La identificación de la madera permite recopilar mucha información, a saber: la durabilidad natural, las características físicas y mecánicas, el origen geográfico y el uso típico que se hace de ella. Es importante conocer la especie de madera porque es la clave para obtener el valor de resistencia a través de una clasificación visual de la resistencia aplicada a cada viga (Calicchio, 2009).

La aplicación de técnicas basadas en medir la velocidad de propagación de ultrasonidos, la resistencia a la penetración de una varilla, la resistencia a la extracción de un tornillo o el análisis de los modos de vibración natural mediante vibraciones inducidas. Tratan de establecer relaciones que permitan mejorar la capacidad de predicción de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Esta predicción resulta especialmente necesaria para aumentar la fiabilidad del cálculo estructural en los trabajos de intervención en edificios con estructura de madera (Herrero, *et. al.*, 2007).

En México el estado de las estructuras y de sus elementos deberá ser cuidadosamente documentado, al igual que todos los materiales utilizados en los tratamientos, conforme al artículo 16 de la Carta de Venecia y los Principios de ICOMOS para el Registro documental de los Monumentos, Conjuntos arquitectónicos y Sitios culturales.

7.5. Situación actual de la Rehabilitación de la Madera en los Monumentos

La rehabilitación de edificios antiguos en Europa tiene ya una trayectoria teórica de al menos 150 años como lo indica la norma UNE-41805-1:2009 IN. Las doctrinas han ido evolucionando y la mejora de las técnicas y de la investigación se mantiene en la actualidad de manera constante. (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

Y dentro de las estructuras de madera, los forjados son la obra más humilde y menos estudiada, “es a partir del II Simposio Internacional sobre Mudejarismo de Teruel en 1981 cuando se comienza a tomar un poco de conciencia colectiva sobre la verdadera dimensión del tema de la carpintería de armar española”, (Fernández, 1997).

Los técnicos a lo largo del siglo XX, especialmente en España, abandonaron y subestimaron la madera. Esto lógicamente influyó con fuerza en los criterios reales de intervención sobre el patrimonio histórico y en la rehabilitación en general. Tradicionalmente los oficios mantenían la calidad del material, la adecuada puesta en obra y en suma conservaban el conocimiento necesario. Los nuevos materiales de construcción permitieron un aumento de la industria de la construcción que dejó de lado la madera. De esta forma se perdió gran parte del conocimiento artesanal que sustentaba su uso, (Ariza, Guerrero y Pinto, 2016).

Esto provocó también que el desarrollo científico y la normativa olvidara la madera, a pesar de que la teoría de elasticidad empezó con los primeros ensayos sobre la madera.

En España y en México los arquitectos y los técnicos generalmente ignoraban la madera, que ya no se enseñaba en las Escuelas. En la actualidad en las escuelas de Arquitectura en España ya es impartida, pero no hace tanto que la Escuela de Sevilla era pionera en este sentido (plan de estudios 1975). En la investigación sobre la madera destacan las Escuelas de Madrid, y más modernamente las de Navarra, Valladolid y Valencia, (Ariza y Ariza, 2016).

En realidad, en España no ha habido una normativa moderna de cálculo con madera hasta que apareció el Código Técnico de la Edificación. Si bien es verdad que con anterioridad los especialistas tenían a su alcance diversos textos a partir de los 90, con el desarrollo de los (CTE, 2006).

En el Euro-código “Proyecto de Estructuras de madera”, hubo también un proyecto fallido de Norma Básica de Estructuras en Madera (NBE-EM-99), y diversas publicaciones entre las que destaca “Diseño y Cálculo de Estructuras de Madera” de AITIM (Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera, es una asociación privada formada por empresas que trabajan en el sector de la madera, miembro de AENOR).

Ha sido la mayor y mejor divulgadora del uso moderno de la madera en España). Estos textos no eran obligatorios, pocos técnicos los conocían, y en ocasiones su empleo resultaba problemático, (Arguelles, 1996; Arriaga, 2000).

La madera es muy sensible a la humedad, y por tanto a la falta de mantenimiento de las cubiertas, etc. Elementos que pueden haber durado siglos desaparecen en menos de una década. En ocasiones también los cambios de uso y las mejoras del confort provocan condensaciones y humedades, como es el caso de la incorporación de las instalaciones modernas, mucho más abundantes que las antiguas, (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

En España y México la madera se usaba tradicionalmente para resolver forjados y cubiertas apoyadas sobre muros. Y lo habitual es encontrar los empotramientos de las vigas con algo de pudrición. Como no había un conocimiento más profundo, esto llevó en muchas ocasiones a desmantelar la madera, se sustituyó la estructura antigua de madera por una de nueva de acero o de hormigón, y así se ha hecho de manera casi sistemática (Nuere, 2007), donde muestra ejemplos como la catedral de Burgos o el Escorial.

Este panorama, aunque en menor medida, sigue siendo vigente, y en cada caso que se repite se pierde un material y un documento único. Si hubiera habido un conocimiento mayor se hubieran mantenido estas cubiertas. Probablemente las vigas y los canes parcialmente podridos mantenían, aun estando mermadas, suficiente sección para resistir el cortante. Hubiese bastado sanearlas, o quizá tras realizar algunos cálculos sencillos efectuar alguna reparación muy elemental, (Alonso, 2000).

Hemos citado algunas razones del desprestigio y de la ignorancia que han sufrido las construcciones con madera. Pero el desconocimiento ahora se produce en otro sentido. Es difícil evaluar el estado de conservación de la madera. Actualmente hay un desarrollo importante de los ensayos no destructivos (END) y de la clasificación de la madera.

Los END permiten evaluar el grado de deterioro, y ambos tipos permiten establecer unas propiedades mecánicas a la madera. Son complejos de aplicar. Requieren un personal muy especializado, ya sean pertenecientes a empresas de laboratorio de control, o bien arquitectos con formación muy específica.

En general son grupos universitarios de investigación los que aplican mayormente estas técnicas, y podemos decir que, aunque sean prometedores y utilizados ampliamente, todavía no forman parte de la normalidad. Y aún hay muchas circunstancias por estudiar, (Gómez, *et. al.*, 2018).

La conservación de edificios es cada vez más importante, como consecuencia de la puesta en valor de los edificios históricos y también fruto de una economía más ajustada, en la que se incluyen además cuestiones medioambientales. Al interés lógico en conservar un material o un sistema constructivo con algún valor histórico, se unen más modernamente el interés en mantener la función resistente y el hecho de que la conservación permite una economía de material, y un menor impacto en el medioambiente, (Ariza y Ariza, 2016).

Consideramos que no es conveniente en absoluto que la madera pierda su función resistente. Si la pierde su función se falsea la realidad; se incorpora un comportamiento diferente que puede comprometer la duración del resto de la obra; y en definitiva es el pasaporte a su desaparición futura, (Ariza, Guerrero y Pinto, 2016).

Existe una enorme variedad de sistemas constructivos tradicionales, cada uno con matices respecto de unos esquemas básicos, que dependen del país y de la región donde nos situemos, del periodo histórico, del carácter del edificio, o incluso de la orden eclesiástica si se trataba de un convento, (Gómez, *et. al.*, 2018).

Esto por sí solo justifica su estudio y su catalogación. Aún hay más margen de estudio, porque unido al desprestigio de la madera ha habido un desconocimiento generalizado de las soluciones constructivas tradicionales. Es poco habitual encontrar descripciones precisas de estos elementos. Por ello, aunque se desarrollaran muchísimo las técnicas de intervención, aún habría un enorme margen de estudio según cada localidad o cada periodo histórico o cada tipo constructivo, (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

Y la hipótesis de que partimos es que se subestima la capacidad de la madera, (Nuere, 2000). En las intervenciones parece que siempre será necesario reforzar las estructuras de madera. Podemos encontrar forjados de madera (u otras estructuras de madera) con 2, 3 o 5 siglos de antigüedad que han llegado hasta nuestros días, y cuando el arquitecto actual interviene en ellos, se ve aparentemente forzado a despreciar esa realidad y reforzarlo o incluso sustituirlo, lo que significa su destrucción, (Ariza, Guerrero y Pinto, 2016).

Por ello no debemos dejar de preguntarnos por qué reforzamos los forjados, pues la respuesta quizá no sea obvia. Una vez se deja a un lado la cuestión de la reparación puntual de aquellas maderas que están deterioradas, es evidente que se suele intervenir reparando necesariamente los forjados. Pongo necesariamente en cursiva ya que en rigor no es cierto, (Ariza y Ariza, 2016).

Un forjado que ha soportado varios siglos de uso no es lógico que quede incapacitado por el hecho de llegar a nuestros días. Y si ha sufrido un deterioro grave, éste se debe con probabilidad a problemas de mantenimiento, a humedades. Es dudoso que haya que adecuar los forjados a una nueva normativa que los vuelve incapaces (Nuere, 2000).

Por ello entendemos que la adecuación de la normativa no debe ser incompatible con la naturaleza de las soluciones constructivas originales.

7.5.1. La inspección y diagnóstico de estructuras de madera

Se ha observado que la prevención es la mejor forma de evitar la degradación de la madera. Tres aspectos son los más relevantes a tener en cuenta: el control de la humedad (cubiertas, bajantes, aireación, etc.), las posibles sobrecargas debidas a los añadidos en las reformas y el propio mantenimiento de la estructura (Esteban, 1988).

Se recomienda mantener las cubiertas con buena impermeabilización y las bajantes en buen estado (lejos de los elementos de madera) y tener la posibilidad de revisar los elementos de madera, sobre todo en el caso de viviendas con falsos techos (COFAN, 1999).

Por último, también es importante realizar un mantenimiento periódico (de forma visual o con instrumentación apropiada) para detectar posibles afecciones y realizar medidas preventivas, en caso de necesitarlas, y así evitar importantes degradación por ataques de termita, hongos y carcinoma (COFAN, 1999).

7.6. Tipos de inspección de las estructuras de madera (Técnicas portátiles y Técnicas fijas)

Actualmente las inspecciones estructurales van acompañadas de un buen soporte metodológico y de equipos fáciles de manipular en los espacios restringidos en los que se encuentra situada la madera estructural, Carballo (2009) en (Carballo *et al*, 2007b), menciona que en el caso de las coníferas ha sido probado en todos los estudios que la norma visual es excesivamente conservadora por ello en estos momentos los trabajos se enfocan en disminuir la cantidad de material subestimado por la normativa visual.

7.6.1. Planteamiento general de la clasificación visual

La caracterización de la madera estructural mediante la inspección visual, es el sistema más antiguo, siendo actualmente el más utilizado. Se basa en la clasificación de la madera estructural en función de determinados parámetros que pueden cuantificarse de forma visual. En la mayoría de los casos sólo se requiere el empleo de un flexómetro o regla, resulta ser un sistema fácil de aplicar. Incluso después de un cierto entrenamiento se puede llegar a clasificar en serie sin

necesidad de medir materialmente los defectos. En la actualidad se cuenta con tablas de clasificación para el mercado americano y europeo, que es en lo que se basan la mayoría de las clasificaciones en nuestro país (Hoadley, 2000).

Carballo (2009) cita a (Fernández-Golfín *et al*, 2003) mencionando que la evaluación visual consiste en la observación directa de las singularidades que presenta la madera. Básicamente, la evaluación compara el tamaño de las singularidades respecto a las dimensiones de la pieza evaluada, según se especifica en una norma de clasificación visual.

El levantamiento, debe obtener información sobre: dimensión y forma de cada elemento de madera, características geométricas como deformaciones y disminuciones de la sección, peculiaridades y defectos de crecimiento (posición de la médula, bifurcaciones y fendas), tipo, posición y longitud de los principales defectos, tipo de pudrición u otro eventual daño presente y la posición de las zonas críticas (Calicchio, 2009).

Es una técnica de evaluación imprescindible para los técnicos antes de adentrarse en otras técnicas no necesariamente más complejas, pero que necesitan inversiones para su implementación en laboratorio, aserradero y obra. Dada la versatilidad y sencillez de esta técnica, es operativa en todos los ámbitos de actuación: laboratorio, industria y rehabilitación de edificios (Carballo, 2009).

La clasificación de resistencia en estructuras de madera en obra se basa en una inspección visual de los elementos de madera, en pruebas no destructivas, la observación de todas las caras visibles y las extremidades de cada elemento. Clasificar según la normativa Española cada uno de los elemento de madera y si es necesario, identificar cada zona crítica por separado es importante para la toma de mediciones en campo (Calicchio, 2009).

7.6.2. La inspección y diagnosis de estructuras de madera

Se ha observado que la prevención es la mejor forma de evitar la degradación de la madera. Tres aspectos son los más relevantes a tener en cuenta: el control de la humedad (cubiertas, bajantes, aireación, etc.), las posibles sobrecargas debidas a los añadidos en las reformas y el propio mantenimiento de la estructura (Esteban, 1988).

En cuanto al primer aspecto, se recomienda mantener las cubiertas con buena impermeabilización y las bajantes en buen estado (lejos de los elementos de madera) y tener la posibilidad de revisar los elementos de madera, sobre todo en el caso de viviendas con falsos techos (COFAN, 1999). Asignar una categoría es necesario que todas las características o defectos. La aplicación de reglas de la clasificación y la asignación del elemento de madera a la

peor categoría son cuestiones necesarias en cada diagnóstico. Si el elemento al ser clasificado conforme su resistencia no entra ni en la categoría más baja, debe definirse “no apto”. Entren en las limitaciones especiadas; no se permite la asignación de categorías intermedias (Calicchio, 2009). Por otro lado, el desconocimiento sobre el estado de la madera y las cargas que puede soportar un estructura de madera lleva a realizar reformas en las que se sobrecargan los elementos de madera produciéndose en algunos casos pandeos (Blogs, s.f.).

Por último, también es importante realizar un mantenimiento periódico (de forma visual o con instrumentación apropiada) para detectar posibles afecciones y realizar medidas preventivas, en caso de necesitarlas, y así evitar importantes degradación por ataques de termita, hongos y carcinoma (COFAN, 1999).

7.6.3. Condicionantes y recomendaciones de la restauración y la rehabilitación en estructuras de madera

En la actualidad existe un amplio marco de teorías, documentos y legislación sobre la intervención en el patrimonio histórico. Dentro de las recomendaciones sobre los criterios generales de intervención, señalamos las consideraciones ICOMOS que es el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios. Fundado el año 1965 en Varsovia (Polonia), tras la elaboración de la Carta Internacional sobre la Conservación y Restauración de los Monumentos y los Sitios Histórico-Artísticos, conocida como "Carta de Venecia", el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios Histórico-Artísticos (ICOMOS, 2017).

Es la única organización internacional no gubernamental que tiene como cometido promover la teoría, la metodología y la tecnología aplicada a la conservación, protección, realce y apreciación de los monumentos, los conjuntos y los referidos sitios. Actualmente es una de las referencias más importantes en lo que a criterios de intervención en el patrimonio se refiere, valorando los materiales; de caracterizarlos; de documentar la intervención; y de catalogar los elementos; etc.

En donde se señalan la necesidad de documentar la intervención, de realizar la inspección “cuidadosamente documentada”, se incide en la “compilación y catalogación” entre otras, y se habla de “diagnóstico exhaustivo”. La documentación es un aspecto fundamental sobre la que se insiste en muchas otras referencias. La interdisciplinariedad de los trabajos de intervención en el patrimonio es otro aspecto relevante y de sobra conocido.

El valor material es otro aspecto con citas recurrentes. No reside exclusivamente en su aspecto exterior, sino que el uso es un valor fundamental perteneciente al mismo (ICOMOS,

2003), en su apartado de “Principios generales por lógica es necesario caracterizar adecuadamente los materiales, entre otras razones para “evaluar el grado de seguridad que estas estructuras ofrecen” (ICOMOS, 2003), en el apartado de “Investigación y diagnóstico”. A su vez las Recomendaciones del ICOMOS, 2017, proponen usar "la misma clase de madera o superior a la existente". Esta consideración es muy lógica y obliga a estudiar la calidad de la madera existente y, por tanto, a caracterizarla.

Sin embargo, en la actualidad no es posible solo en contadas excepciones disponer de madera de la misma especie o similar y que sea de igual o de mejor calidad que la antigua. Antiguamente existía más madera o se podían seleccionar piezas de mejor calidad, despreciando el resto para construcciones de menor calidad u otros usos. En la actualidad se logra la mayor eficacia entre producción y calidad, lo que es deseable cuando se dispone de recursos limitados. La intervención no puede ser destructiva. Para ello debe ser reversible, (ICOMOS, 2003).

Un ejemplo claro de irreversibilidad lo constituyen los refuerzos usados cuando se trata de aumentar la capacidad de carga de la madera. En la práctica totalidad de las soluciones, se procede a soluciones que son difíciles de desmontar, (Ariza y Ariza, 2016; Gómez, *et. al.*, 2018).

Las soluciones que emplean hormigón son costosas de demoler y de retirar. Como la losa se ha de conectar y apoyar en los muros laterales, dejan el perímetro de los muros muy afectados. Otra situación que plantea problemas de reversibilidad son los empotramientos de las vigas. En ellos aparecen procesos de pudrición que requieren eliminar la parte de madera enferma.

El tratamiento curativo que sería necesario en estos casos para reincorporar la madera afectada y de forma segura, resultaría desproporcionado, difícil o inútil. Este tipo de actuaciones sí son habituales en otros ámbitos de la restauración, estatuaria y pintura, donde no existen las implicaciones estructurales propias de la arquitectura, (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

El ICOMOS es por tanto una de las fuentes más importantes para establecer los criterios generales de intervención. Aun así, hay aspectos que, siendo interesantes y deseables, resultan complicados de aplicar estrictamente en la rehabilitación arquitectónica.

Las dificultades en este sentido son todavía mayores cuando se pretende rehabilitar un patrimonio que no tiene un carácter marcadamente monumental, que sin embargo también debe ser respetado, y al cual se aplican soluciones donde el valor económico tiene más presencia frente a las soluciones técnicas, estéticas etc.

7.5.4. Términos como rehabilitación, reparación y restauración

Hay un problema con el significado y el uso de los términos que se emplean en el ámbito de la restauración patrimonial. Más aún si se trata de términos extraídos de documentos genéricos, que tratan de la protección de bienes muebles e inmuebles, (Ariza, Guerrero y Pinto, 2016).

Los artículos de Jiménez, 1997 y 1998 resultan muy expresivos al respecto de la confusión de términos. Por ejemplo, encontramos las definiciones de los términos rehabilitar, restaurar, reutilizar en el texto de (Pérez, Úbeda y Fernández,1994), y otras similares en otros textos dedicados también a la rehabilitación.

- Pueden resultar útiles las definiciones de la norma de inspección UNE-41805- 1:2009 IN. Parte 1. “Definiciones, donde:
- “2.32 rehabilitación: intervención en un edificio dirigido a mejorar su funcionalidad o a recuperarla, con el fin de ponerlo de nuevo en uso o de adaptarlo a un uso distinto del original.”
- “2.33 reparación: intervención para recuperar la prestación de materiales, elementos o sistemas constructivos lesionados de un edificio”
- “2.34 restauración: intervención que tiene como objeto la recuperación de un bien de interés cultural manteniendo sus valores.
- También se establece sus definiciones, transcritas del CTE (los subrayados son añadidos):
- “2.2. Según su finalidad, las obras en edificios protegidos pueden ser:
 - a) Se consideran como obras de reparación las necesarias para enmendar un menoscabo producido en un bien inmueble por causas fortuitas o accidental.
 - b) Si el menoscabo se produce en el tiempo por el natural uso del bien, las obras necesarias para su enmienda tendrán el carácter de conservación. Las obras de mantenimiento tendrán el mismo carácter que las de conservación.
 - c) Son obras de restauración, aquéllas que tienen por objeto reparar una construcción conservando su estética, respetando su valor histórico y manteniendo su funcionalidad.
 - d) Son obras de rehabilitación aquéllas que tienen por objeto reparar una construcción conservando su estética, respetando su valor histórico y dotándola de una nueva funcionalidad que sea compatible con los elementos y valores originales del inmueble.
 - e) Será también rehabilitación la remodelación de un edificio protegido con viviendas que tenga por objeto modificar la superficie destinada a vivienda o modificar el

número de éstas, o la remodelación de un edificio protegido sin viviendas que tenga por finalidad crearlas.”

Según esta fuente, el término rehabilitación es una reparación que respeta el valor histórico pero que dota de una nueva funcionalidad (diferente), o bien que no aporta esa diferente funcionalidad si se trata de viviendas, (Ariza, Guerrero y Pinto, 2016).

Comúnmente usamos la palabra rehabilitación de manera imprecisa. Pero creemos que este uso común podría definirse como las actuaciones de reparación de edificios que poseen un valor histórico o de antigüedad (sea este valor reconocido administrativamente o no) que no es máximo, en las cuales, haya o no cambio de uso, hay un mayor compromiso hacia la utilización y la economía, (Gómez, *et. al.*, 2018).

El termino restauración, se suele aplicar a edificios que poseen un gran valor histórico, reconocido y que la actuación se pondrá más del lado de la conservación y preservación y menos del lado del compromiso con el uso o con la economía.

Estas definiciones tienen como objeto en el caso arquitectónico:

- Restauración, un bien de interés cultural (UNE).
- Rehabilitación (UNE), un edificio (se sobre entiende que existente, con alguna antigüedad o con algún valor histórico, aunque sea mínimo).
- Restauración y Rehabilitación (CTE), edificios protegidos.
- Según se puede deducir del ámbito de aplicación, son edificios con algún grado de protección declarado que obliga a justificar las actuaciones.

En el caso de la norma italiana UNI-11130 en cuyo título aparecen los “bienes culturales”. Esto incide lógicamente en la definición de los valores, sobre la que ya se trató anteriormente. Pueden considerarse objeto y parte de la definición de los términos restauración frente a rehabilitación los valores históricos, artísticos, de antigüedad (si no es lo mismo que el valor histórico, (Jiménez, 1997) o simplemente el hecho administrativo de poseer algún grado de protección, desde los BIC, hasta la incursión en algún catálogo monumental o poseer un grado máximo de protección urbanística.

7.6.5. El proceso de inspección de las estructuras de madera de una edificación en un centro urbano (en España)

Una inspección detallada que permite conocer el estado de la madera en cada local de una manera detallada. Se describe la patología de origen biótico y se proponen las medidas de actuación (Arriaga, Esteban y Bobadi, 2006).

Arriaga, *et al.* (2006), nos presenta un ejemplo de un diagnóstico efectuado en un edificio situado en el casco histórico de un pueblo de la Comunidad de Castilla y León. No se incluyen los detalles de localización porque procede de un informe de inspección real y es necesario preservar la privacidad de los datos y forma parte de un capítulo de la publicación “Intervención en Estructuras de Madera” de AITIM (trabajo realizado a lo largo de los últimos 20 años realizando intervenciones en edificios con estructura de madera).

Cada ejemplo es expuesto a modo de ficha en la que se recogen los aspectos fundamentales, estructurados de la misma forma puede servir de referencia para el técnico que busca información de un tipo concreto de edificio (Arriaga, Esteban y Bobadi, 2006).

Antecedentes (Localización aproximada, primera detección de daños y alarma, planteamiento general y objeto, descripción general: tipo de edificio, antigüedad, número de plantas, tipo de construcción, uso actual). **Inspección** (Existencia de planos y otra documentación previa).

Accesibilidad (Número de visitas necesarias, medios disponibles para la inspección, limitaciones a la inspección). **Patología de origen biótico** (Zonas inspeccionadas, identificación de los daños, estimación de la gravedad de los daños, análisis de las posibles causas).

Peritaje estructural (Toma de datos: dimensiones, luces, calidad, especie, flechas y deformaciones, otras lesiones, bases de cálculo: clase de servicio, clase resistente, acciones, etc., resultado de cálculo: índices de agotamiento y deformaciones). **Conclusiones** (Valoración del estado actual, necesidad de medidas de actuación, medidas de actuación frente a la patología de origen biótico).

7.7. La calidad de la madera de recuperación y su clasificación en las intervenciones arquitectónicas

De acuerdo con los euro-códigos las tensiones de cálculo se obtienen mediante dos coeficientes K_{mod} (coeficiente de modificación) Y_{m} (coeficiente de minoración del material). En la Unión Europea se usan las tensiones admisibles. En contraste, antes de la entrada en vigor del CTE en España se aplicaban las tensiones básicas, que estaban íntimamente relacionadas con los ensayos sobre probetas de tamaño pequeño también llamadas “libres de defectos”. A partir de las tensiones básica se obtenían las tensiones admisibles, (Peraza, *et al.*, 1990).

La clasificación actual se realiza por especie y procedencia (país) y va asociada a los ensayos realizados sobre probetas de tamaño real (vigas) (UNE-EN-1912:2005). El resultado son clases resistentes que en el momento presente van desde la C-14 hasta la C-30 en coníferas. La clasificación visual de la madera es el método más usado actualmente para determinar la resistencia de la madera nueva. También lo es en la rehabilitación, en competición o junto con

los ensayos de ultrasonidos debido a su relativa sencillez y fiabilidad de respuesta, (Esteban, 2003). El citado trabajo de Esteban es probablemente una de las investigaciones más importantes sobre la clasificación de madera antigua, (Argüelles y Arriaga, 1987; Peraza, *et. al.*, 1990).

El principal problema que presenta actualmente la clasificación en la rehabilitación es que en general las normas existentes son aplicables a la madera nueva. Usar las normas actuales en una rehabilitación no es un inconveniente ya que la madera vieja se le supone una equivalencia con la madera nueva de la misma especie y procedencia, y una calidad que como veremos al menos es igual o superior. Esta equivalencia se ha utilizado con relativa frecuencia, a falta de otras normas (Basterra, 2005).

Pero no deja de ser por ello una solución provisional. Hay varias razones para realizar una norma de clasificación adaptada a la madera vieja. Casi siempre es imposible ver la superficie superior de la viga cuando está en el sitio. Las gemas superan ampliamente las máximas establecidas en normas para madera nueva, aunque esto difícilmente será un problema grave, (Rodríguez-Moreno, *et. al.*, 2016).

Determinados defectos como son, fendas y flechas, se pueden asumir en una madera vieja y se considerarían graves en una madera nueva. Ocurre lo mismo con los ataques por insectos, que están prácticamente eliminados en las normas de clasificación y son comunes en las maderas antiguas, (Basterra, 2005).

Entre las normas de clasificación visual aplicadas a maderas (sean de gran escuadría o no) Esteban señala (2003, p.34): DIN 4074 alemana, UNE-56.544 española, NF 52-001 francesa INSTA 142 países Nórdicos, BS 4978 británica, NGRDL EE. UU. - NLGA canadiense, Recomendaciones de la CEE en la norma marco UNE-EN 51. La norma UNI-11.119 italiana. Dicha norma incluye la clasificación de madera vieja para la restauración y los criterios de inspección.

Las maderas de coníferas son especialmente adecuadas para el uso estructural, pues, aunque ofrecen menos resistencia mecánica que la de determinadas frondosas, como el roble, en general sólo se verán afectadas por deterioro en el caso de sufrir una humedad excesiva (Rodríguez-Barreal, 1989; Argüelles y Arriaga, 1989).

8. Métodos y Técnicas Ultrasonicas de Inspección y de Medición

Las normas actuales de clasificación visual, disponibles para madera de pequeña escuadría, no contemplan el caso particular de las grandes escuadrías y de las estructuras antiguas de madera, pero sirven de base para el desarrollo de unas nuevas reglas de clasificación visual aplicables. Desde la última década, se han desarrollado nuevas tecnologías para evaluar las propiedades mecánicas de la madera mediante el uso de pruebas no destructivas. Anteriormente, solo se reconocía la calificación visual, penalizando el material por la baja precisión del método.

Se realizarán los siguientes pasos para los análisis de los casos de estudio, primero en campo y posteriormente en laboratorio con el fin de validar y comparar mediciones en ambas condiciones con el apoyo de distintos equipos y técnicas.

- Inspección visual con el fin de planificar la mejor estrategia a emplear para cada caso.
- Levantamiento Arquitectónico del área (medidas del área y de los componentes estructurales a analizar).
- Identificación de las zonas y puntos idóneos para efectuar las mediciones.
- Selección del equipo apropiado para la toma de datos (velocidad de propagación de una onda de baja frecuencia, el tiempo de propagación de la onda y el porcentaje del contenido de humedad).
- Toma de datos en campo y digitalización.
- Obtención de material por medio de muestreos (empleando el criterio y metodología de la investigación de maestría) o de donación (en los casos donde sean cortadas, reparadas o sustituidas las piezas estructurales de madera).
- Análisis de laboratorio (medición de las propiedades mecánicas del material por medio de técnicas no destructivas y destructivas, obtención de propiedades químicas como los porcentajes de lignina en las muestras y tratamientos que estas muestras presenten como pigmentos, aceites, pesticidas, etc. Estudios anatómicos de identificación de especie y de características generales del estado microscópico de las paredes celulares de las muestras.
- Análisis de datos obtenidos en campo y laboratorio.
- Obtención de resultados.

Sandoz (2006) comenta que la Medición ultrasónica desde 1985 y el método ultrasónico para la medición de los rendimientos mecánicos de la madera: el módulo de elasticidad: MoE y la resistencia a la flexión ha sido validada para la madera como material estructural. A finales de los años 80, se realizó una transferencia de tecnología con el dispositivo Sylvatest a través de los resultados de un trabajo de tesis. Este dispositivo se basó en la medición de la velocidad de propagación de una onda de baja frecuencia transmitida en el eje longitudinal de la madera.

Dentro de los ensayos no destructivos utilizados en elementos y estructuras de madera, los instrumentos basados en la medición del impulso ultrasónico han sido utilizados con distintos grados de éxito en la evaluación del estado de la madera en estructuras en servicio desde 1966 (Rodríguez, 1995)

Al efectuar los análisis ya mencionados en las estructuras de madera se observó que los valores del Módulo de Young en madera sana y deteriorada eran muy semejantes; se procedió a la realización de un análisis químico que pudiera apoyar los resultados de las pruebas no destructivas. Con este estudio se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por las pruebas de ensayos no destructivos ya efectuados a este material (Carrillo, 2019; Carrillo, 2019 b; Carrillo, 2020) y el análisis de estudio básico químico de las maderas, siguiendo la metodología empleada en el posgrado.

La variación de las propiedades mecánicas de la madera debido al envejecimiento es una consecuencia del cambio en la microestructura de la madera. Informaron una disminución en la cantidad de "materiales celulósicos", atribuyendo la mayor rigidez de la madera envejecida a la cristalinidad de la celulosa, observando un incremento en la cristalinidad durante los primeros 100 años, seguido de una disminución progresiva (Cavalli, 2016).

8.1. Técnicas Ultrasónicas de Inspección

Rodríguez (1995) cita los trabajos realizados por Palaia y Galvaña sobre la aplicación de los ultrasonidos a la determinación de los estados de deterioro. Sus investigaciones están basadas en el análisis de las señales de un osciloscopio incorporado al aparato de ultrasonidos.

Dentro de la inspección ultrasónica, se utilizan principalmente dos técnicas de inspección las cuales son: la técnica ultrasónica de inmersión y la técnica ultrasónica de contacto; las cuales se explican brevemente a continuación.

8.1.1. Técnica Ultrasonica de contacto

La técnica ultrasonica de contacto tiene el mismo principio de funcionamiento que la técnica ultrasonica de inmersión. En esta técnica a diferencia de la anterior, no se utiliza tanque de inmersión para poder adaptar el medio acoplante como se observó anteriormente, si no que el transductor se coloca sobre la superficie de la pieza a inspeccionar, sin embargo, se tiene que utilizar un medio acoplante entre la cara del transductor y la superficie de la pieza. Dicho acoplante puede ser agua, glicerina, aceite o miel. A continuación, se muestra la figura 8.1 en la cual se representa la técnica Ultrasonica de contacto (Popp, 1990).

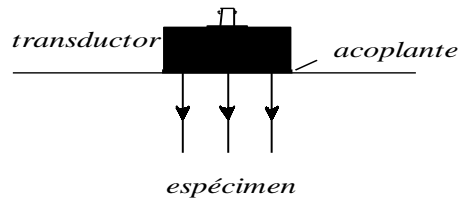


Figura 8.24. Técnica Ultrasonica de contacto.

8.1.2. Método Eco Pulso

Es el método de Eco Pulso es uno de los métodos ultrasonicos más utilizados para la caracterización de materiales, dado que con este método de análisis es posible realizar tanto mediciones de la posición de los ecos, así como mediciones de la intensidad de estos. El principio de funcionamiento de este método es el siguiente:

Ráfagas cortas de energía ultrasonica (Pulsos) son introducidos en una pieza de prueba en intervalos regulares de tiempo, si el pulso encuentra una superficie reflectora (con una impedancia acústica diferente) alguna o toda la energía es reflejada. La cantidad de energía reflejada es altamente dependiente del tamaño de la superficie reflejante al tamaño del haz incidente. La energía reflejada puede ser monitoreada, como se dijo, tanto en amplitud como en tiempo de aparición de esta (ver figura 8.2), (ultrasound, 2001).

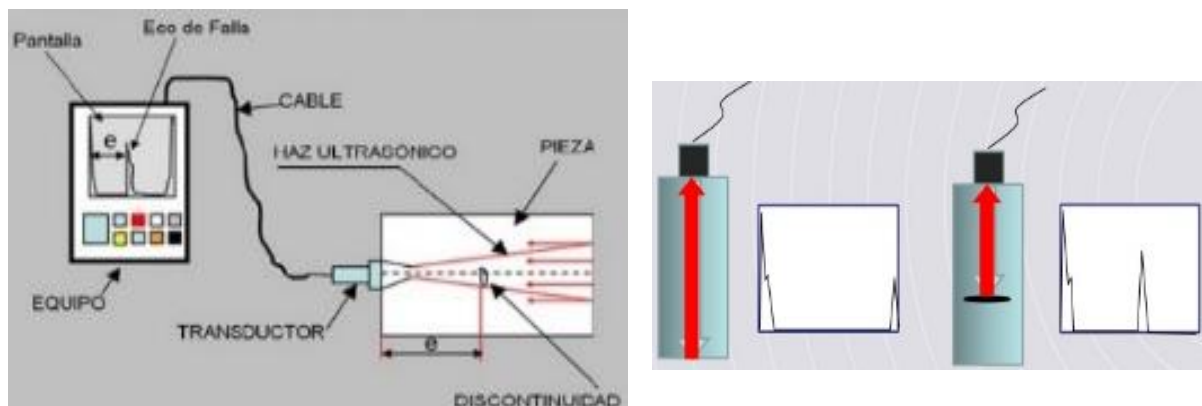


Figura 8.25. Diagramas del Método de eco pulso.

8.1.3. Método de transmisión

Es más indicado para la medición en materiales heterogéneos. Se emite la onda por un palpador emisor y se recibe en otro palpador receptor colocado al otro extremo del recorrido del haz de ondas por el interior del material. En este caso se emiten ondas con frecuencias más bajas para permitir un mayor alcance de los impulsos y no verse afectadas por la falta de homogeneidad en el interior del material. Una emisión a frecuencias más bajas permite suponer una distribución del haz de ondas con un frente de onda esférico cuyo centro se sitúa en el palpador emisor y cuya dirección radial concentra la máxima presión sonora. Al colocar los palpadores emisor y receptor de manera enfrentada la onda tenderá a recorrer el material por el camino más corto, que será el de la dirección axial de la pieza, pero tendrá que sortear las irregularidades o discontinuidades que encuentre a lo largo del recorrido, (ver figura 8.3) (Popp, 1990).

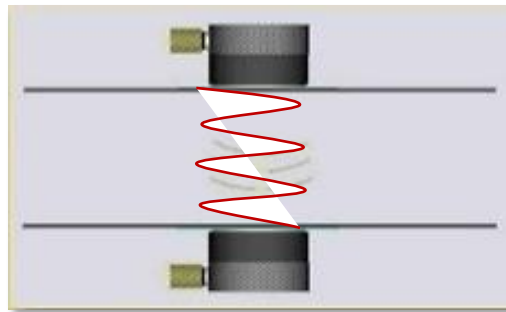


Figura 8.26. Método de Trasmisión.

8.1.4. Método de resonancia

La emisión de ondas se realiza sobre probetas más pequeñas y con una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia de la propia probeta, produciéndose una amplificación de la oscilación. Los valores de elasticidad pueden deducirse a partir de las frecuencias de resonancia, la densidad y las dimensiones de la probeta. Este método es costoso y complejo en equipos, puesto que requiere un emisor electrodinámico de oscilaciones, y sólo es aplicable en laboratorio, ver figura 8.4 (Kránitz, 2013).

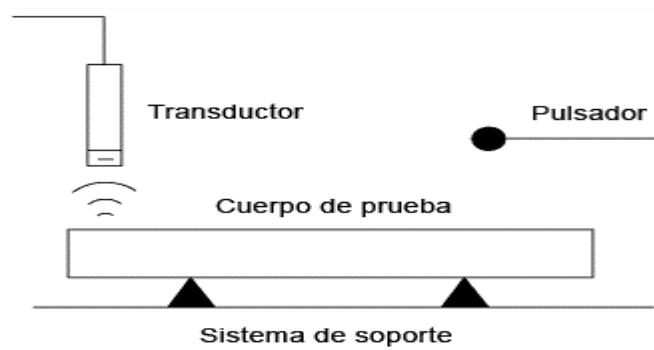


Figura 8.27. Método de Resonancia.

8.1.5. Análisis de vibraciones

Aprovecha el fundamento del diapasón y se basa en el estudio y análisis de las vibraciones producidas en el material y la frecuencia propia del mismo. La mecánica del ensayo consiste en impactar con un martillo sobre la pieza estudiada para producir esas vibraciones. El equipo más utilizado en España es también de la empresa Fakopp y se denomina PLG (Portable Lumber Grader-Clasificador portátil para madera). El equipo contempla la medida de la velocidad de transmisión de la onda vibratoria y de la densidad, proporcionando una muy buena estimación de los módulos de elasticidad de cada pieza en estudio (Carballo, 2009).

8.2. Tipos de equipos de inspección empleados en las estructuras de madera (Técnicas portátiles y Técnicas fijas)

El valor máximo del pico de energía representa, por lo tanto, una medición de la respuesta acústica de la madera que traduce fielmente la función de amortiguación. Esta nueva generación de dispositivos, capaces de medir y gestionar las dos variables acústico-ultrasónicas, permite trabajar en el eje natural de la madera: el longitudinal, el radial y el transversal. (Sandoz, 2006)

8.2.1 Fakopp Microsecond Timer

Es un método de evaluación rápido y liviano para emplear en campo. Está diseñado para medir el tiempo de propagación de la onda de estrés en los árboles. La señal se genera con un toque de martillo en el sensor de inicio y la unidad muestra el tiempo de propagación medido. Al medir la distancia entre los dos sensores, se puede calcular la velocidad y se puede usar para detectar partes o huecos dañados entre los dos sensores, ver figura 8.5 (Fakopp, 2018).



Figura 8.28. Fakopp Microsecond Timer (Fakopp, 2018).

8.2.2 Equipo de Ultrasonido para la técnica de contacto

El equipo de Ultrasonido que se empleó para los ensayos Ultrasonicos es un equipo de la marca: Le Croy wave Surfer 432, 350 MHz- Oscilloscope 2Gs/s con un pulsador /receptor modelo: 5072PR, así como un par de transductores longitudinal: V103 y un par de transductores transversal: V151 empleando la técnica ultrasónica mostrada en la figura 8.6.

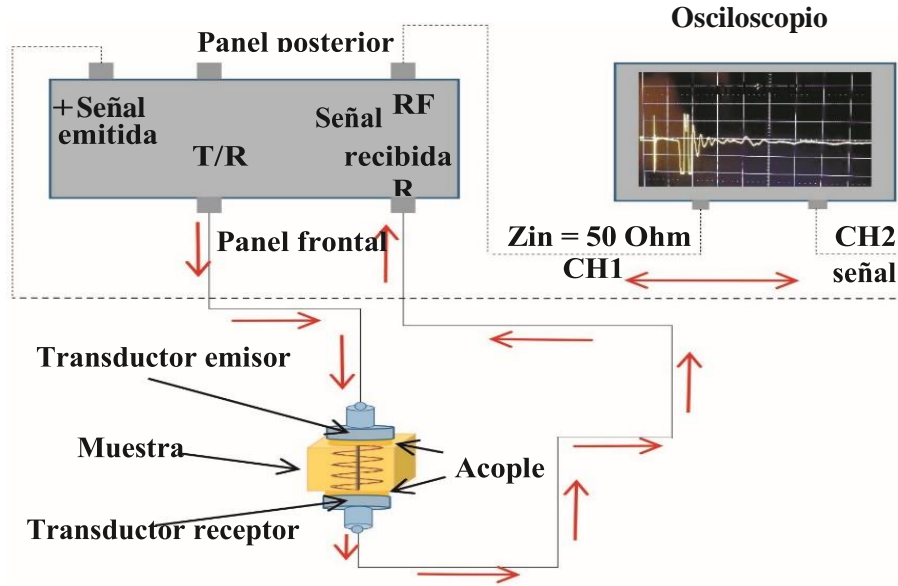


Figura 8.29. Esquema de Equipo de Ultrasonido.

Pulsador/receptor Modelo Panametrics; La función de este dispositivo es equivalente a la función de una fuente de alimentación, dentro de un circuito eléctrico, el generador de señales está conformado por un circuito pulsador, o generador de velocidad, además de ser la fuente de alimentación su función es controlar la frecuencia, amplitud y velocidad de repetición del pulso de voltaje, los cuales excitan al transductor transmisor. El pulsador/receptor que se empleara en este trabajo se muestra en la figura 8.7 a.

El Osciloscopio HP digital es el dispositivo se muestran las señales eléctricas emitidas y transmitidas en forma digital (ecos de la pared posterior de la probeta) a través del material excitado por el transductor al estar inspeccionando las probetas, las señales eléctricas son convertidas y mostradas para ser analizadas posteriormente. En la figura 8.7 b se muestra el Osciloscopio utilizado.

a



b

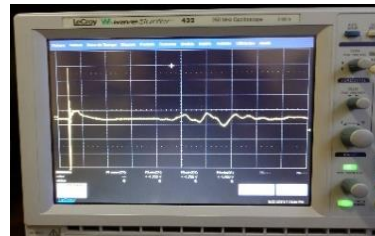


Figura 8.30. Pulsador/Receiver Modelo Panametrics (a) y Osciloscopio HP digital (b).

El transductor es el elemento del sistema que genera y recibe las ondas ultrasónicas, este elemento está contenido dentro de un dispositivo la mayoría de las veces referido como una

unidad de rastreo (o sensor). Un transductor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, en forma de sonido y viceversa. Los componentes principales son el elemento activo, el apoyo (backing) y una placa protectora (wear plate), ver figuras 8.8.

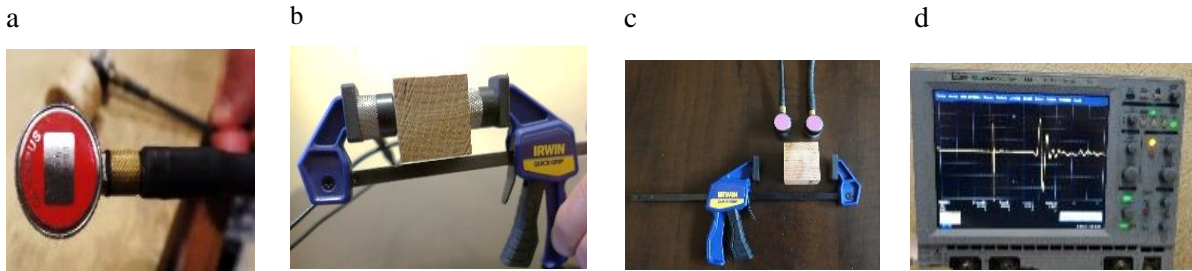


Figura 8.31. Transductores de onda longitudinal V103 (a), muestra de madera y transductores (b), transductor de frecuencia 1.0Mhz (c), Osciloscopio HP digital (d).

Adquisición de señales Ultrasonicas. Los digitalizadores ultrasónicos muestran en la pantalla del osciloscopio una gráfica de voltaje (amplitud de la onda) contra tiempo, en un experimento de tiempo real un convertidor de señales es utilizado para capturar la forma de la onda ultrasónica, el tiempo que se requiere para capturar la señal en tiempo real es muy corto por lo que se requiere de convertidores de señales analógicas a digitales de alta eficiencia, la mayoría de los digitalizadores ultrasónicos pueden realizar promedios de las señales recibidas de una gran cantidad de ciclos para reducir el ruido electrónico y también asegurar la calidad de las mediciones realizadas.

En la figura 8.9 se ilustran las señales obtenidas de un experimento en tiempo real. Una vez que la señal es digitalizada, es posible transferirla a una computadora para su análisis e interpretación. Una etapa de procesamiento común utilizado por muchos sistemas involucra el cálculo de espectros de frecuencia utilizando análisis de Fourier. (Sandoz, 2006).

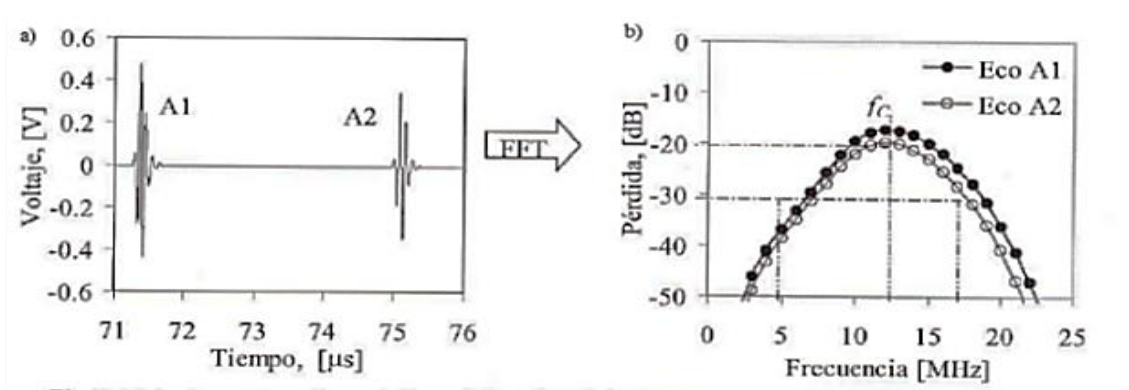


Figura 8.32. Transformación de un pulso en el dominio del tiempo (a), dominio de la frecuencia (b).

9. Material y Metodología

Debido a las dificultades que se presentan para los diagnósticos en estructuras de madera, es necesario contar con una metodología que permita instrumentar de forma profesional el proceso. Permitiendo que sea posible diagnosticar de forma instrumentada el estado actual de la madera. Para esta investigación se propone una metodología de actuación para las inspecciones de edificaciones con estructuras de madera, basada en la bibliografía consultada. Retomando puntos importantes que se señalan en las normas anteriormente mencionadas, las cuales han brindado buenos resultados en sus países de origen. Los puntos importantes para considerar en este trabajo para el análisis de los casos de estudio son: Antecedentes, Inspección, Patología de origen biológico, Peritaje estructural y Conclusiones.

Como herramientas de apoyo debemos de considerar la utilización de fichas, en las cuales se contemplan: Croquis en planta (situación de los elementos constitutivos de madera), Croquis de la sección, con la descripción de la sección del elemento de madera, descripción de los acabados y revestimientos o decoraciones, datos del estudio visual y organoléptico, deformaciones, estado general de conservación y lesiones, presencia de manchas y hongos y humedad en general, Ataque de insectos xilófagos detallado, termes y fotografías, realizadas preferiblemente en el momento de la redacción de la ficha, y que se integren al reporte. A continuación, se muestran los puntos de forma desglosada para una mejor comprensión de cómo llevar a cabo cada uno de los puntos (ver figura 34, 35, 36 y 37).

Las estructuras de madera del patrimonio se caracterizan por una organización jerárquica de sistemas, unidades y elementos, con conexiones que juegan un papel fundamental en la transferencia de carga. Las características en las diferentes escalas de la estructura y las interdependencias entre los niveles jerárquicos deben analizarse y los datos deben recopilarse de manera armonizada, para su evaluación exhaustiva (Rodríguez, 1995).

El primer nivel de evaluación se refiere a la estructura en su conjunto, su geometría tridimensional y su configuración, para determinar si la disposición estructural es adecuada para su función de soporte de carga, con respecto a todas las posibles condiciones de carga.

Los techos compuestos son subestructuras de segundo nivel como las armaduras planas o estructuras verticales compuestas de marcos planos que están conectados transversalmente son elementos lineales. En el tercer nivel son simples, como puntales, tirantes, vigas o columnas.

Finalmente, se deben considerar las juntas de carpintería, los soportes, las áreas de interfaz con otras estructuras y materiales y las conexiones (Rodríguez, 1995).

9.1. Esquemas de estrategias de actuación para inspecciones de edificaciones con estructuras de madera

En el trabajo se presentan tres casos de estudio ubicados en el Centro Histórico de la ciudad de Morelia (ver figura 9.1), los cuales fueron analizados utilizando el método de Ondas de Esfuerzo, la de Emisión Transmisión que son método de carácter no destructivo que han demostrado eficiencia para la caracterización mecánica de elementos estructurales de madera (Li *et al.*, 2015; Dahle *et al.*, 2016; Kloiber *et al.*, 2016; Chen y Guo, 2017).



Fuente: Ciudades Mexicanas Patrimonio Mundial

Figura 9.33. Mapa del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia, Michoacán (implanmorelia, 2016).

Este enfoque es complementario a otras técnicas y métodos para asegurar la confiabilidad estructural de edificaciones de madera con valor histórico y cultural (Machado *et al.*, 2011; Kránitz *et al.*, 2014; Arangelovski *et al.*, 2015; Feio y Machado, 2015; Henriques y Neves, 2015; Kloiber *et al.*, 2015; Sousa *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Cavalli *et al.*, 2016a; Cavalli *et al.*, 2016b; Milch *et al.*, 2016; Sousa *et al.*, 2017; Barozzi *et al.*, 2018; Walsh-Korb y Avérous. 2018).

Para los tres casos de estudio se determinó el Contenido de Humedad de la madera, su Densidad, la Velocidad de Onda Longitudinal y Onda Trasversal, el Módulo de Young, la Atenuación Ultrasonica, la Birrefringencia, estudios Anatómicos por medio de Microscopia Electrónica de Barrido, Caracterización Química Básica y pruebas Físico-Mecánicas.

Las muestras analizadas fueron una parte representativa de las vigas de madera de recuperación (deterioradas) presentes en los casos de estudio y se compararon estos parámetros con los medidos en las vigas de madera de reciente corta (sanas), que sustituyeron en las edificaciones a las existentes debido a trabajos de restauración de estos.

Para lograr esto, se propuso modelar a la madera como un material elástico, macroscópicamente homogéneo y de medio continuo, con una ortotropía material y elástica. La investigación valoro la técnica de carácter no destructivo de Ondas de Esfuerzo en la evaluación de la resistencia mecánica en las vigas de madera de recuperación y de reciente corta (Íñiguez-González *et al.*, 2015).

El resultado de la aplicación de los puntos descritos en la metodología facilita la creación de documentos que apoyen a la toma de decisiones en los procesos de restauración, rehabilitación y reparación de las estructuras de la madera de recuperación. Mediante la creación de un conjunto de documentos que apoyen al restaurador en su trabajo y sea posible un mejor diagnóstico. Los documentos resultantes de la utilización de esta metodología que se proponen son:

Documento de evaluación del edificio (donde se muestra el estado actual de la madera y las consecuencias de que esta situación se prolongue), Documento de estudio de viabilidad (donde se concreta cómo sería factible una intervención en los elementos estructurales), Proyecto básico (en este punto se presentan las actuaciones de manera concreta y real para ser evaluado antes de ser autorizado) y Proyecto de ejecución (en este punto se puede decir que ya se estaría listo para comenzar con los trabajos correspondientes).

Con toda la bibliografía consultada se elaboraron los esquemas que se presentan a continuación para la realización de los diagnósticos. Los puntos analizados en este trabajo para los casos de estudio son los que se indican en los diagramas siguientes ver figura 9.2.

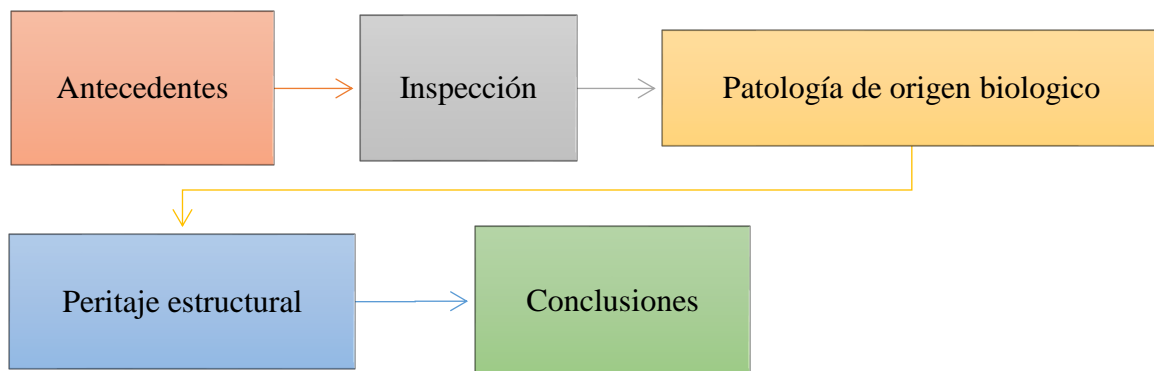


Figura 9.34. Diagrama general de procedimientos sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.

A continuación, se muestran los puntos de la figura 9.2 de forma desglosada para una mejor comprensión de cómo se llevó a cabo cada uno de los puntos ver figura 9.3, 9.4 y 9.5:

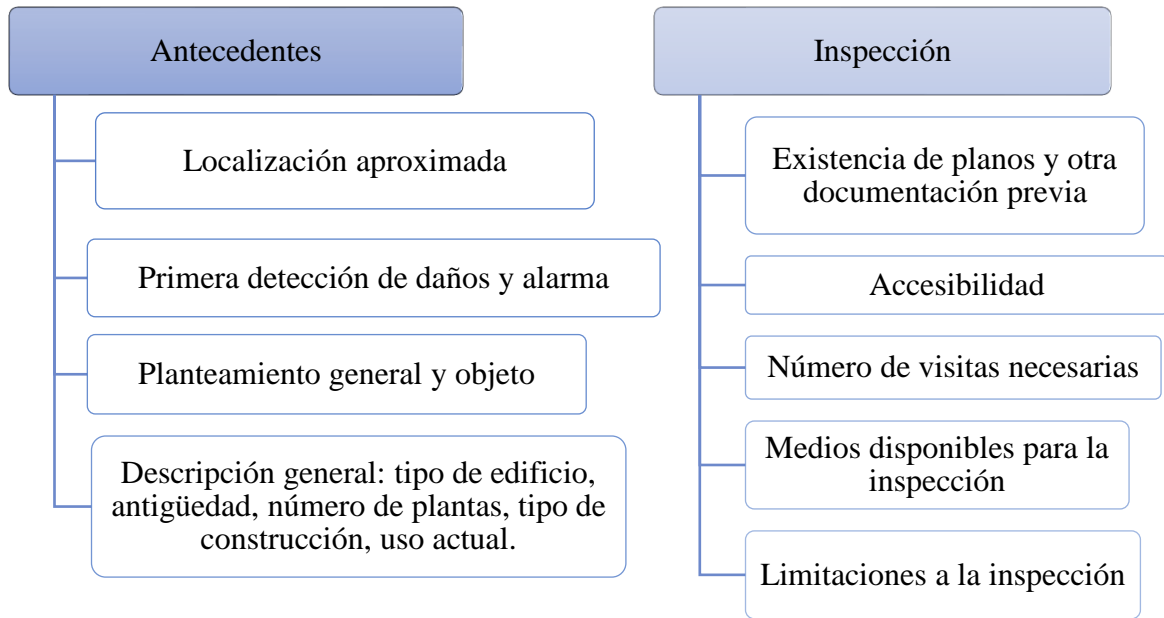


Figura 9. 35. Diagrama de antecedentes e inspección de procedimientos.

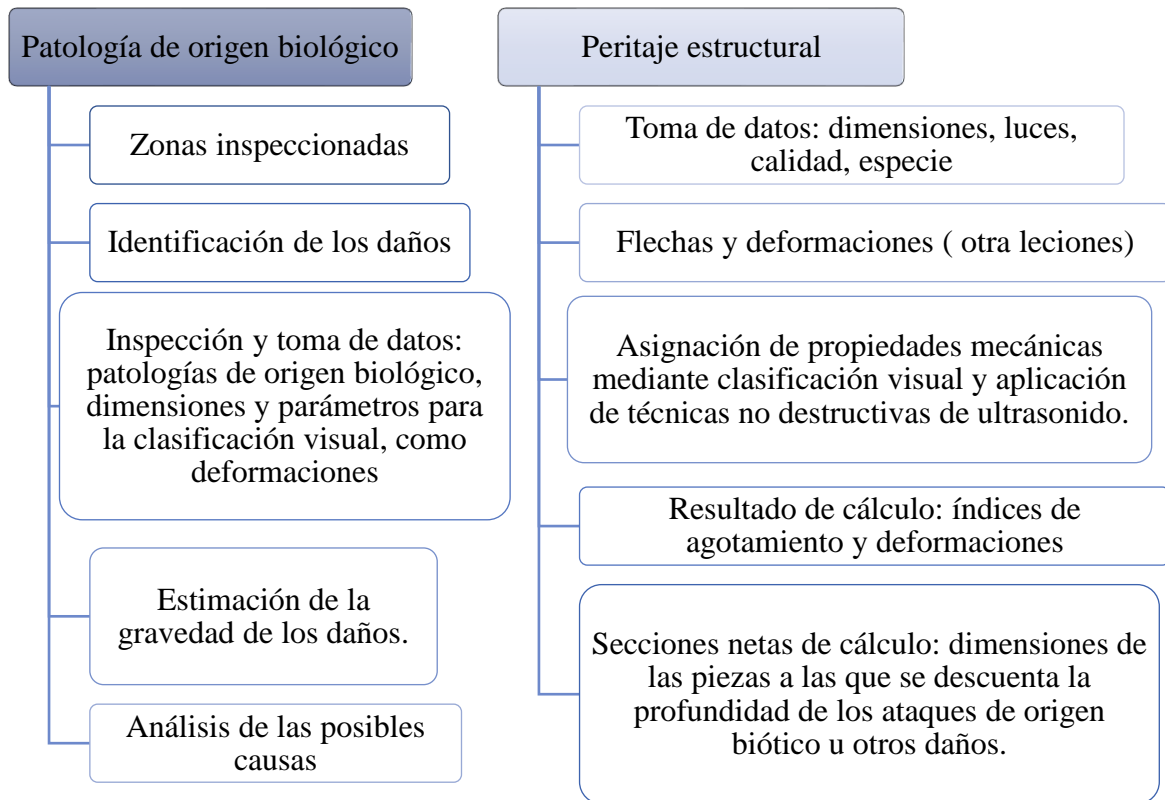


Figura 9.36. Diagrama de procedimientos para Patologías de origen biológico y Peritaje estructural sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.

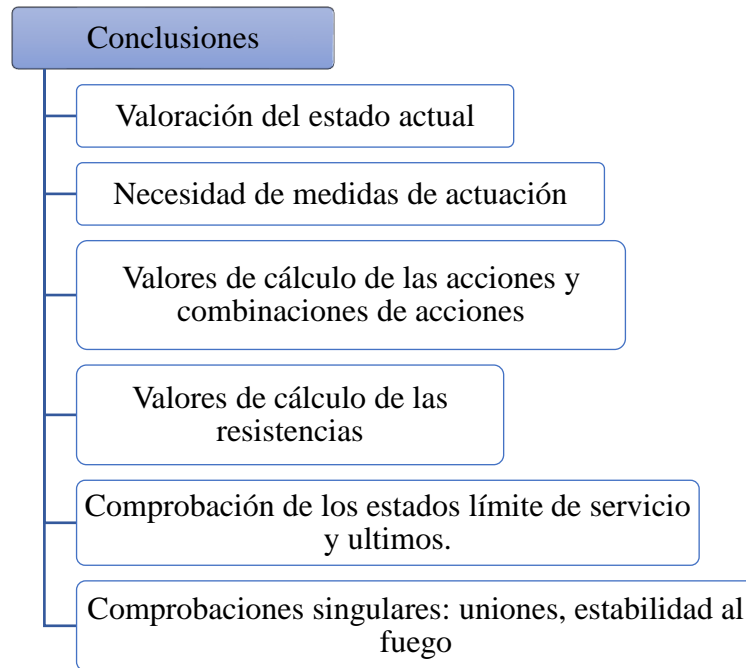


Figura 9.37. Diagrama de Conclusiones y procesos sugeridos para efectuar un diagnóstico en una edificación histórica.

Sobre la metodología de intervención se puede concluir que es importante sea considerada ya que esto permite realizar mejores intervenciones de restauración, rehabilitación y reparación de elementos estructurales de madera.

El contar con una metodología basada en normas ya aplicadas a casos similares brinda una mayor certeza al ejecutor en la toma de decisiones y en la reutilización de la madera que aún se encuentra en condiciones de seguir trabajando como un elemento estructural. Actualmente es muy importante la autenticidad de los elementos en edificaciones de carácter histórico, por tanto, este tipo de evaluaciones ayudan a conservarlas, además de proteger el Patrimonio Histórico también ayudamos a la conservación del medio ambiente. Este enfoque es complementario a otras técnicas y métodos para asegurar la confiabilidad estructural de edificaciones de madera con valor histórico y cultural.

9.1.1. Descripción general de los casos de estudio y la metodología general

El primero es el diagnóstico realizado a un monumento histórico, edificio situado en la Avenida Madero Oriente N. 799, en la ciudad de Morelia Michoacán, México. Esta edificación fue construida originalmente (Centro Histórico de la ciudad) como casa habitación, en la actualidad es un recinto que albergo las oficinas del Centro INAH Michoacán y forma parte de los bienes del instituto. En su momento resguardo la totalidad de las oficinas de dicha institución

(actualmente solo algunos de sus espacios continúan con este uso). La distribución original es la de una casa habitación del periodo colonial. Aplicando el método no destructivo de Ondas de Esfuerzo, se analizó la madera que soporta el enterrado de la periferia del patio principal el cual presenta problemas de humedad en algunas vigas (por medio de inspección visual se localizaron las zonas afectadas).

Se analizaron 83 vigas del género *Pinus*, las cuales estaban expuestas en tres de sus caras al ambiente de exterior. Se estima que su periodo de servicio fue de 50 años aproximadamente según los datos proporcionados. Las vigas presentaban un deterioro importante en los extremos próximos al patio. Se elaboro un diagnóstico de estructural donde se determinó el Contenido de Humedad y pruebas de Ondas de Esfuerzo.

En este caso se identificaron las áreas y los elementos estructurales que se encuentran en malas condiciones y que por lo tanto es necesario sean sustituidos. Para este caso la humedad fue un factor importante en la determinación de las áreas de riesgo, pero no es el único factor que deterioró la estructura, también los agentes biológicos la degradaron.

Las mediciones ultrasónicas *in situ* permitieron confirmar que los datos obtenidos de La Inspección Visual y el monitoreo del % del Contenido de Humedad si son datos comprobables de manera científica, que verifica los puntos de riesgo de la estructura. Para este caso no fue posible contar con muestras del material, se espera en una etapa posterior se gestione por parte del INAH el recurso para la sustitución de estos elementos.

En el segundo Caso se efectuaron mediciones a la madera de la vigería de la Catedral Metropolitana de Morelia en el segundo nivel del edificio de la Mitra (ver figura 9.6). En este caso se efectuó una intervención y sustitución de elementos estructurales de madera ubicados en la azotea del edificio (previo se realizó un diagnóstico a cargo de un particular y bajo la supervisión del inspector designado por el INAH) y el aprovechamiento de algunos de ellos en otras áreas del mismo edificio. Como en el caso anterior la humedad fue un factor importante en el deterioro de la estructura de madera (los agentes biológicos también se encontraron presentes).

Entre los edificios que integran el patrimonio artístico de la ciudad de Morelia resalta en primer lugar la Catedral Metropolitana de Morelia ubicada en la capital del estado de Michoacán, México (1660 a 1744), (González, 2006). Es en esta área de la Catedral conocida como La Mitra en donde durante los trabajos de restauración una habitación de la sala capitular se diagnosticó como deplorable el estado de las vigas de madera que sostienen el entramado del techo de un salón de sus oficinas. En consecuencia, se procedió a su remplazo por vigas de aserrado reciente.

Como es recurrente en este tipo de estructuras son las áreas de las cabezas de las vigas las que presentan una mayor degradación. A diferencia del caso 1 si fue posible el contar con material de donación para efectuar pruebas de laboratorio. El reporte anterior solo expone los resultados de los análisis efectuados en el lugar, para este reporte se presentan los primeros resultados de laboratorio, pruebas que aún no concluyen para este material.

El caso 3 corresponde a la intervención del entre piso de la zona nombrada como cuarto azul del Edificio conocido como Palacio Federal, el cual se ubica en la Avenida Madero Oriente n. 369, en Morelia Michoacán (ver figura 9.6). Se realizaron trabajos de caracterización de las condiciones de las vigas existentes utilizando el método de observación para posteriormente efectuar mediciones utilizando métodos no destructivos.



Figura 9.38. Plano del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia en donde se muestran los principales Monumentos y los 3 Casos de estudio (turismocultural, 2020).

El motivo de la sustitución de los elementos fue propiciado principalmente por la deformación de estos a consecuencia de una sobre carga y por la degradación propia del material sometido a diversos factores. La humedad para este caso no fue el motivo principal para ser sustituidos y como en los otros dos casos se encontró presencia de ataque de tipo biológico

(termitas y hongos). Se analizaron los elementos sustituidos, así como los nuevos en el lugar. Para los tres casos se siguieron los procedimientos que se muestran en los siguientes esquemas, (ver figuras 9.7-9.13).

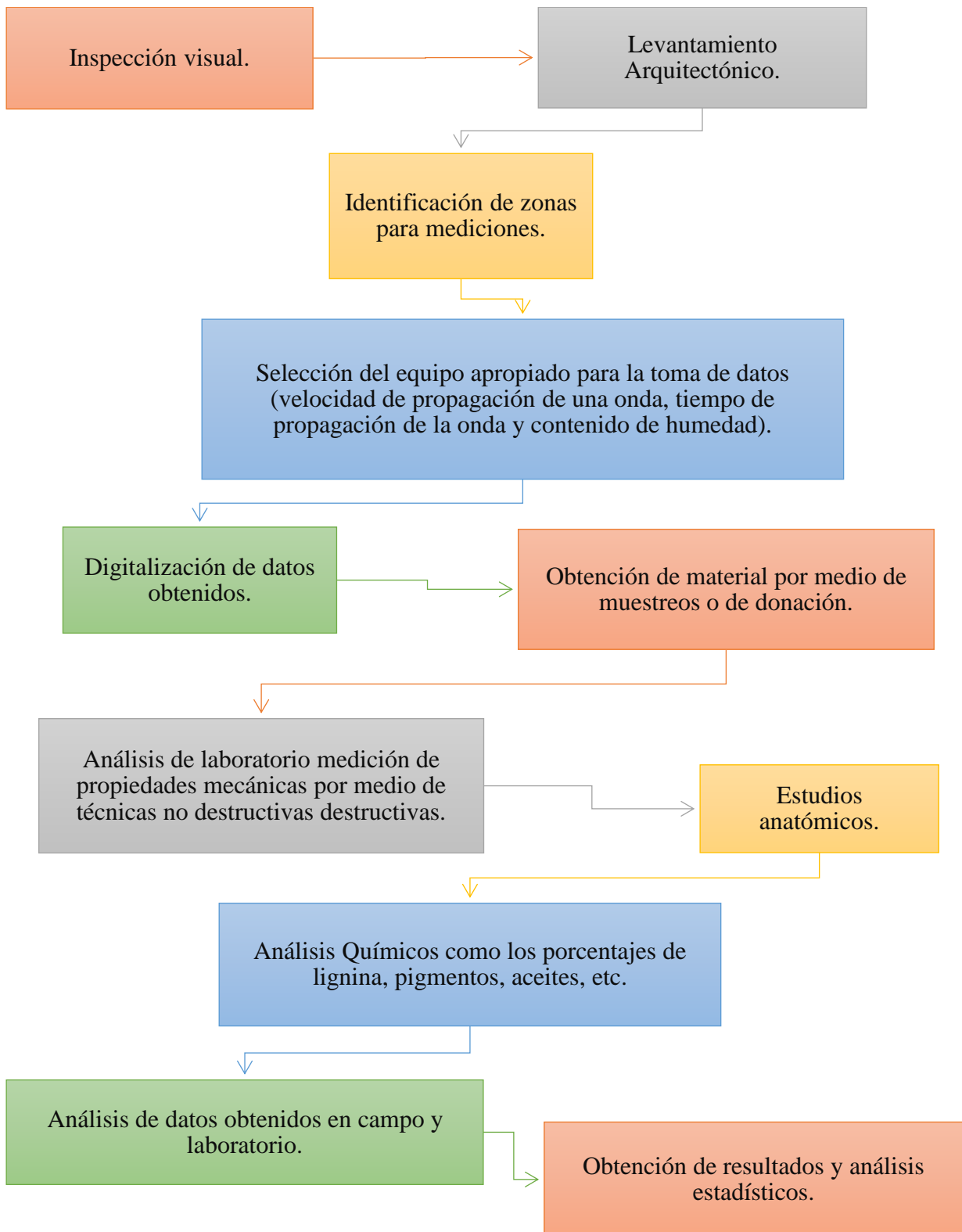


Figura 9.39. Diagrama de secuencia del análisis de los casos de estudio.

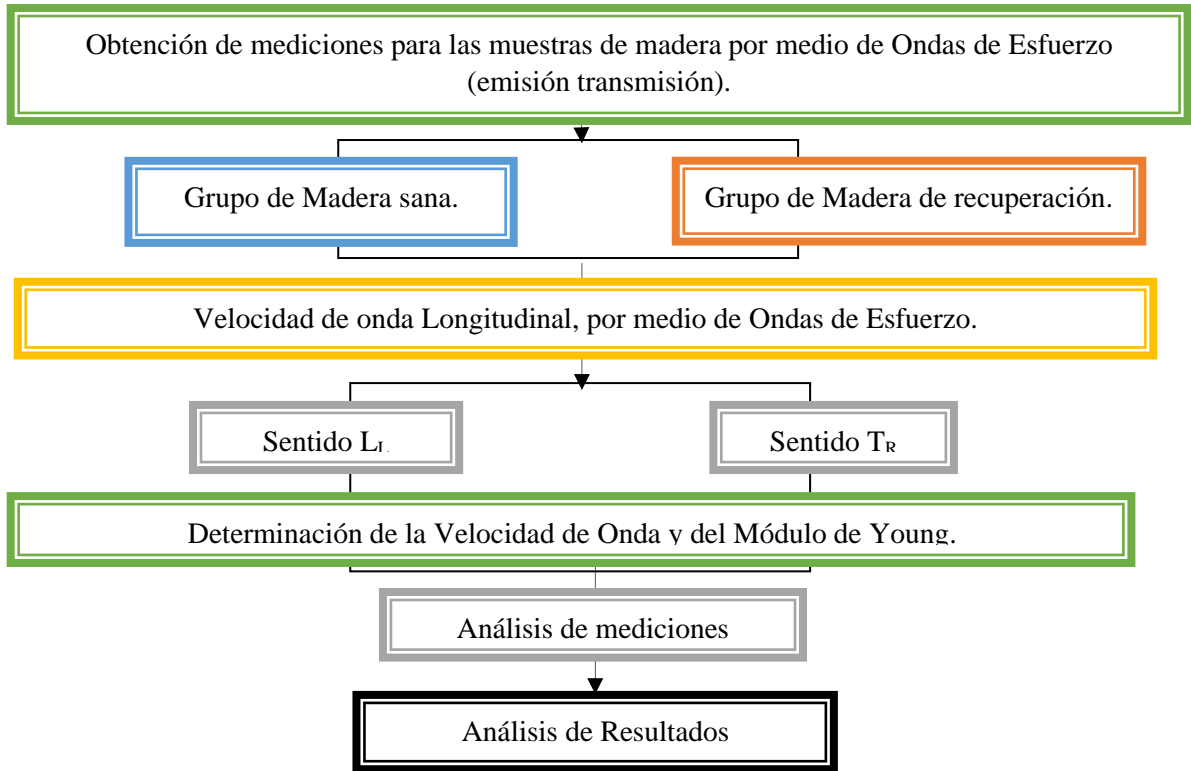


Figura 9.40. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado *in situ*.

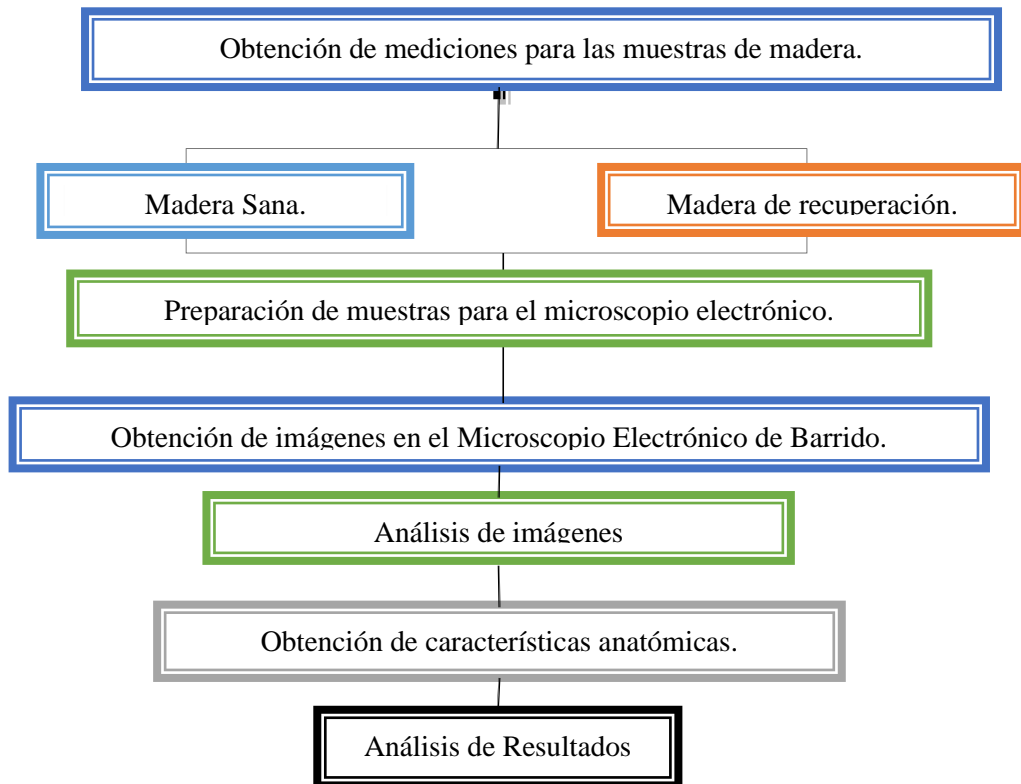


Figura 9.41. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para análisis anatómico.

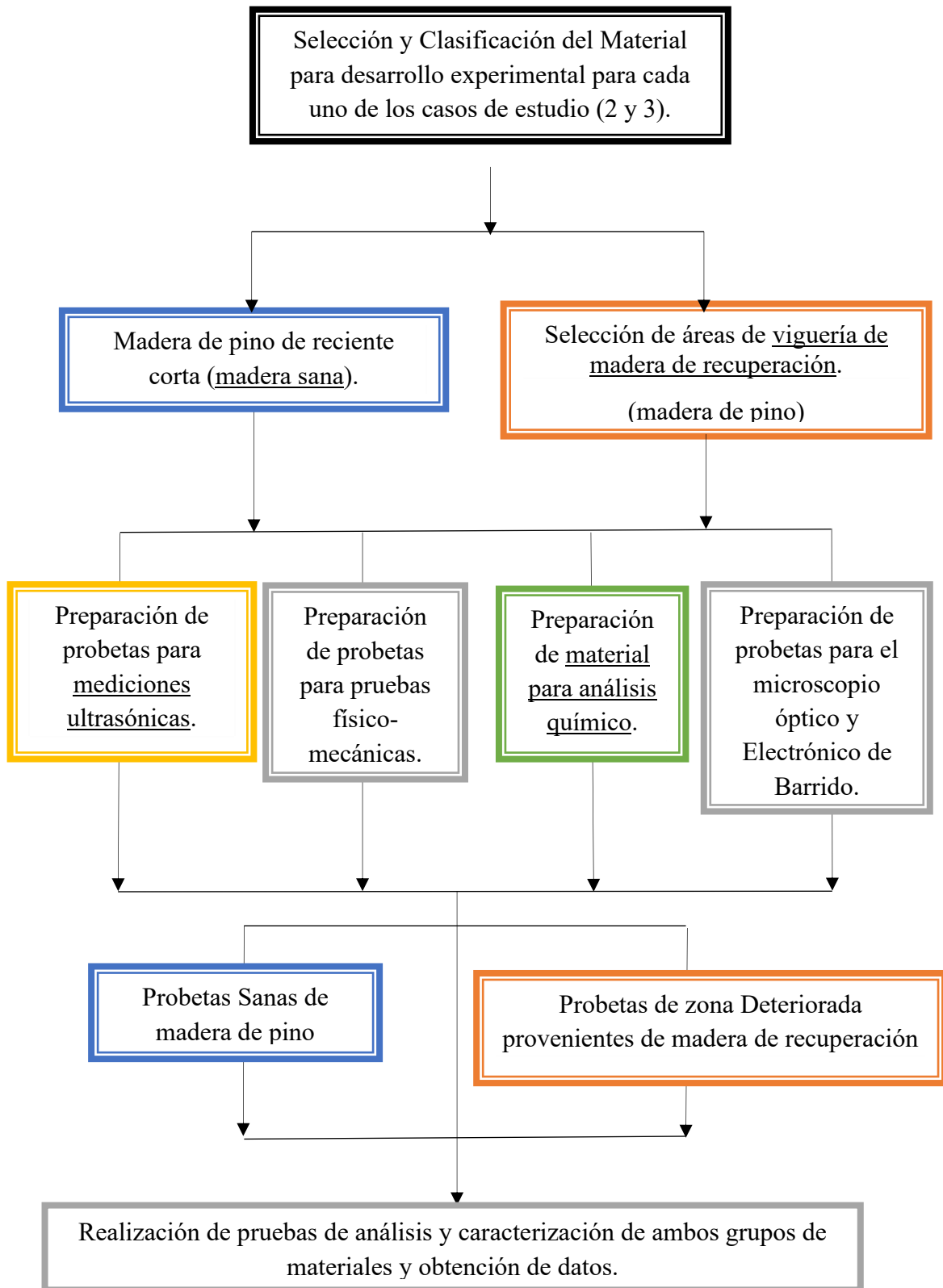


Figura 9.42. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado para muestras de laboratorio.

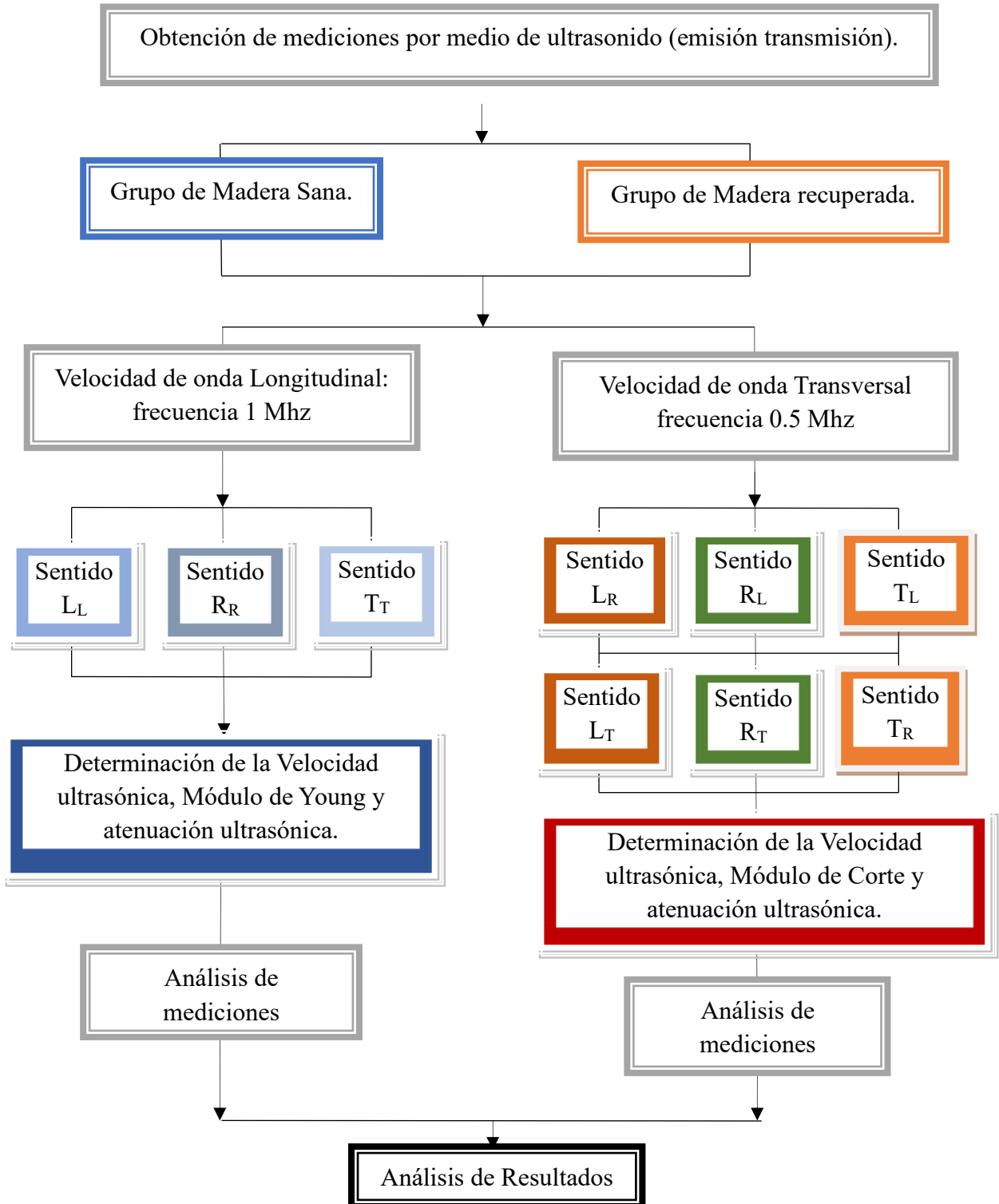


Figura 9.43. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para mediciones ultrasónicas en laboratorio.

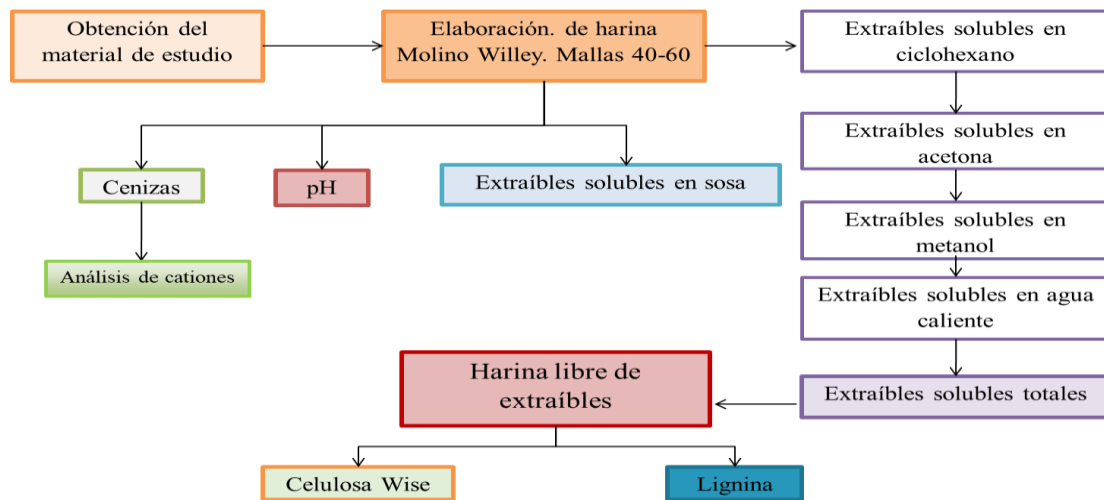


Figura 9.44. Diagrama de procesamiento del material deteriorado, para caracterización química.

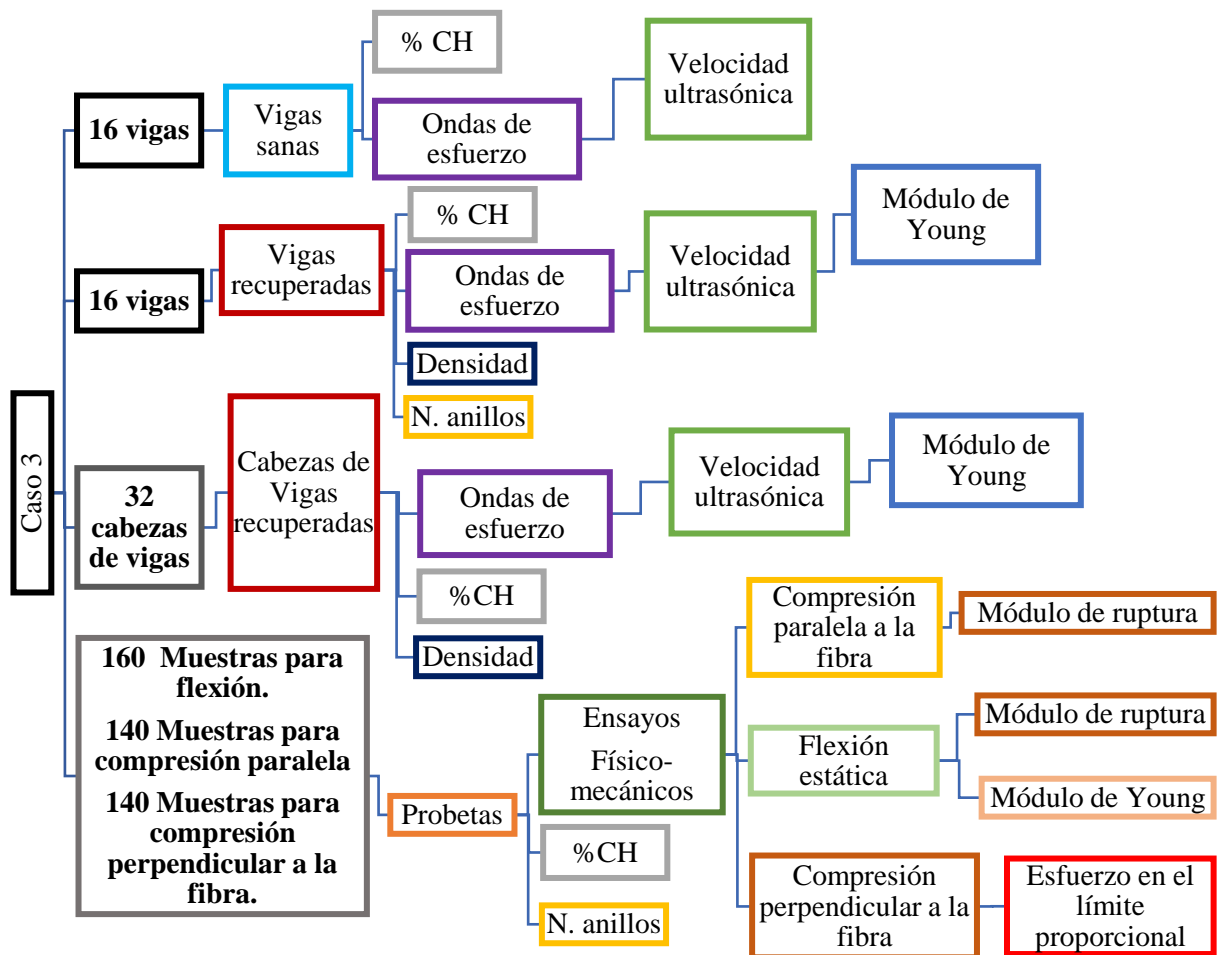


Figura 9.45. Diagrama de procesamiento del material sano y deteriorado, para pruebas físico-mecánica.

10. Caso 1

Se ha observado que la prevención es la mejor forma de evitar la degradación de la madera. Tres aspectos son los más relevantes para tener en cuenta: el control de la humedad (cubiertas, bajantes, aireación, etc.), las posibles sobrecargas debidas a los añadidos en las reformas y el propio mantenimiento de la estructura (Esteban, *et al.*, 1988).

Existen factores específicos de las estructuras de madera de importancia primaria para la comprensión de su comportamiento, que hacen de su evaluación una operación compleja y distinta. Todos estos factores están relacionados fundamentalmente con la naturaleza orgánica de la madera, a diferencia de otros materiales de construcción, y aunque son diversos, todos son estrictamente interdependientes en su efecto sobre la respuesta estructural de las estructuras de madera (Riggio, *et al.*, 2018).

Los arquitectos e ingenieros deben evaluar la calidad de una estructura para poder planificar su reemplazo, su renovación o, en el mejor de los casos, su conservación. Como material biológico y debido a muchos efectos ambientales, la madera, incluso de una misma especie, tiene una amplia gama de propiedades mecánicas (Sandoz y Benoit, 2006; Carrillo, *et al.*, 2018).

La identificación de la madera permite recopilar mucha información, a saber: la durabilidad natural, las características físicas y mecánicas, el origen geógrafo y el uso típico que se hace de ella. Es importante conocer la especie de madera porque es la clave para obtener el valor de resistencia a través de una clasificación visual de la resistencia aplicada a cada viga (Calicchio, *et al.*, 2009).

Se puede suponer y admitir que la causa más importante de decisiones equivocadas en cualquier proceso, dando por supuesta la capacitación del o de los individuos que toman las decisiones, es una falta de información o de métodos adecuados que le lleven a una correcta interpretación de la realidad, o de la toma de datos que constituyen la base sobre la cual se van a producir las decisiones.

10.1. Antecedentes

El caso de estudio 1 es un edificio situado en la Av. Madero Oriente N. 799, en la ciudad de Morelia Michoacán, México, ciudad Patrimonio de la Humanidad, desde 1991 (ICOMOS, 1999) Dicha edificación forma parte de los edificios que con forman los bienes del Instituto Nacional

de Antropología e Historia (INAH) y que en su momento resguardo las oficinas de dicha institución (ver figura 10.1).

El edificio cuenta con una distribución típica de las edificaciones del periodo colonial con un patio principal, el cual realiza la función de espacio de distribución de las habitaciones de la casa, cuenta con una segunda planta a la cual se tiene acceso por medio de una escalera de madera pertenece a la estructura original de la casa. Al cambiar el uso de esta edificación se modificaron algunos espacios se anexaron nuevos o se subdividieron, esto con el fin de poder emplear el recinto como oficinas.



Figura 10.1. Fachada principal de la casona propiedad del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

El área del patio principal se encuentra rodeada en tres de sus cuatro lados por un pasillo descubierto formado por un conjunto de vigas. En el cual se están presentando problemas de humedad en algunas vigas, en el pasillo 1 y la mitad de las vigas del pasillo 2. La mitad del pasillo 2 y el pasillo 3 ya fueron reemplazados hace más de 10 años por estar en malas condiciones. Por medio de inspección visual se localizaron las zonas afectadas como medida predictora para las vigas más recientes de los pasillos y para localizar las que necesitan ser reemplazadas.

La presente investigación propone como hipótesis que las características físicas y mecánicas de las vigas antiguas, pueden ser medidas *in situ* y proporcionar un perfil con el cual sea posible conocer las condiciones de la estabilidad estructural, y así efectuar un diagnóstico previo a una intervención.

El objetivo fue emplear una metodología de trabajo basada en la aplicación de métodos no destructivo como medida predictora para la inspección y evaluación, *in situ*, del estado de elementos estructurales de madera. Basándonos en las medidas de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas, empleando equipos portátiles, de fácil manejo y apta para su empleo en piezas estructurales de madera. Para así mejorar los diagnósticos de las edificaciones, enfocadas especialmente a la restauración y rehabilitación.

Se observó que varias de las áreas cuentan con plafones y por lo tanto la viguería se encuentra cubierta y no es posible acceder a ella (ver figura 10.2 a); las áreas en donde no existe el plafón y en las cuales son visibles las vigas (ver figura 10.2 b y c), se nos comentó que fueron sustituidas con anterioridad y no muestran daños exceptuando el área del pasillo del patio principal en el cual se están presentando problemas de humedad en algunas vigas.



Figura 10.2. Áreas de la casa que cuentan con plafones y área del pasillo del patio principal.

Entre las modificaciones que se realizaron se colocaron plafones en la mayor parte de la casa. Debido a las condiciones del edificio solo fue posible la realización de una inspección de diagnóstico en el área del patio principal utilizando el equipo Fakopp.

10.2. Inspección y Metodología

La estrategia experimental de esta investigación consistió en analizar viga por viga una muestra representativa del entramado del techo (Branco *et al.*, 2017; Carrillo, *et al.*, 2019). En este estudio de caso, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y a la comparación de dos temporalidades de vigas de madera aserrada originaria de árboles originarios de regiones ecológicamente similares. Se consideraron los puntos siguientes:

- Antecedentes (Descripción general: tipo de edificio, antigüedad, número de plantas, tipo de construcción, uso actual).
- Inspección (Existencia de planos, documentación, levantamiento arquitectónico y estructural).
- Patología de origen biológico (clasificación visual, detección de problemas de origen biológico).

- Peritaje estructural (Asignación de propiedades mecánicas mediante clasificación visual y aplicación de técnicas no destructivas de ultrasonido).
- Conclusiones (Estado actual y propuesta de solución).

El factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y a la comparación de dos temporalidades de vigas de madera aserrada originaria de árboles originarios de regiones ecológicamente similares. Se considera mínima la influencia de las características del crecimiento del árbol, de donde provienen las vigas. El grupo de vigas fue estudiado desde la parte empotrada al muro hasta la cabeza expuesta de las vigas.

Durante la experimentación, la temperatura se mantuvo constante, en tanto que la humedad en la madera se observó de manera variable tanto en las zonas de las cabezas de las vigas que dan al patio como en la longitud de cada una de ellas. En el mismo contexto, con el objeto de simplificar el fenómeno y para interpretar las mediciones de la velocidad de onda, se excluyó el efecto del amortiguamiento de la onda mecánica y se idealizó como si viajara en una sola y única dirección.

Por cuestiones de seguridad del edificio por ser parte de las oficinas del instituto no fue posible contar con los planos del inmueble en los que se observen las plantas, cortes y detalles del edificio. Se realizó el plano arquitectónico del levantamiento del área del patio principal (ver figuras 10.3 y 10.10).

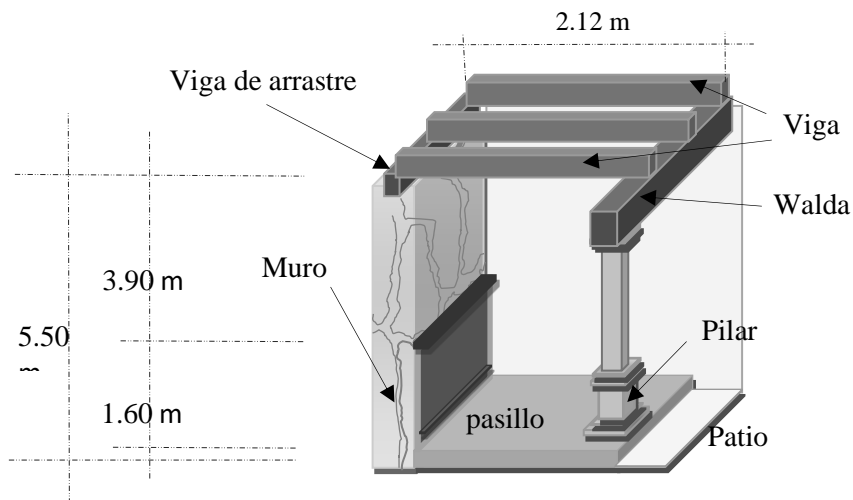


Figura 10.3.Elementos que conforman los Pasillos 1, 2 y 3.

10.2.1. Patología de origen biológico

Se encontraron tres condiciones generales de deterioro de la vigería. En el pasillo 1 se observó que había nidos de aves en algunas de las cabezas de las vigas, así como ataque de termitas y

hongos (Figura 10.4 (a) y 10.5). El pasillo 2 presenta problemas de humedad y rajaduras en algunas zonas (Figura 10.6 b).

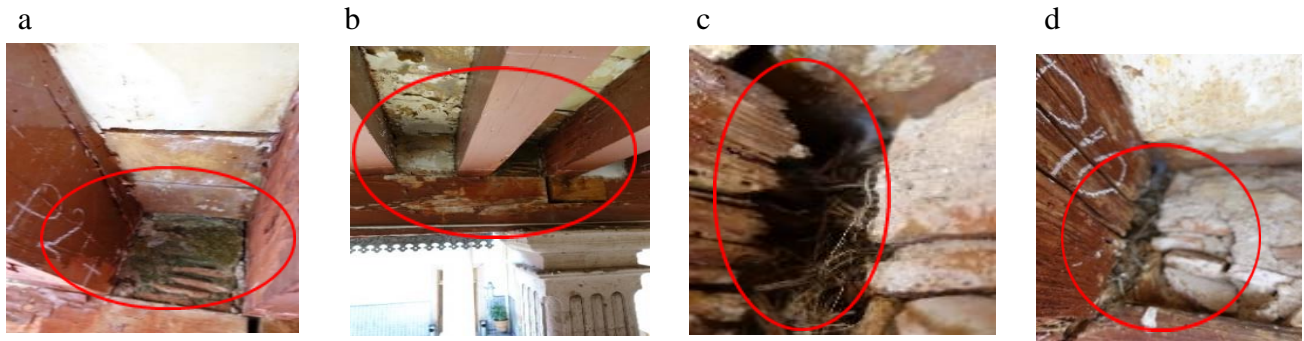


Figura 10. 4. Vista de las condiciones de las vigas que conforman el Pasillo 1 (se observa el efecto de la humedad) (a), en el pasillo 2 se muestran los daños (deformación por carga) (b), marcaciones para la toma de datos en las vigas del pasillo 3 (c).

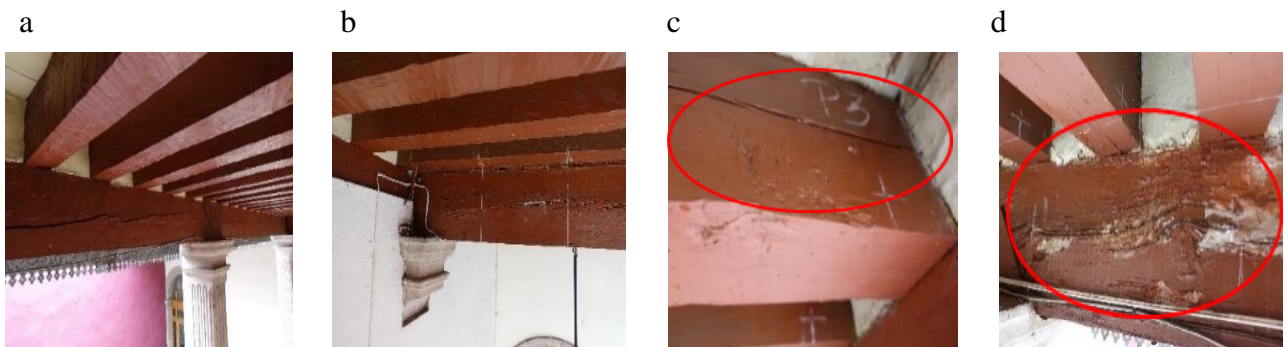


Figura 10. 5. Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 1.

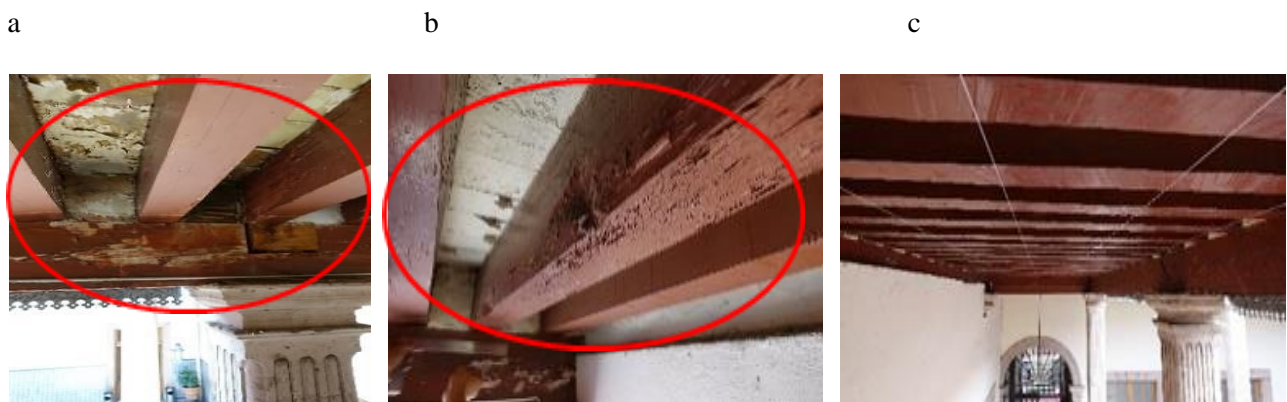


Figura 10. 6. Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 2.

En el pasillo 3 se observó que los elementos estaban en buenas condiciones no presenta ataques de tipo biológico, solo se puede observar que en algunas zonas existen desprendimientos de pintura (Figura 10.7).



Figura 10. 7.Vista de las condiciones de los elementos que conforman el Pasillo 3.

10.3. Peritaje estructural

En lo que concierne al estado estructural se midieron cada una de las 83 vigas. Se encontró variación en las dimensiones entre las vigas de los pasillos. Las vigas con dimensiones de áreas menores son las del Pasillo 1 y las más mayores fueron las del Pasillo 2. Las flechas y deformaciones que presentan los pasillos son más evidentes en el Pasillo 1, a diferencia del pasillo 3 que se encuentra en buenas condiciones.

Para los estudios en campo se utilizó los equipos Fakcopp (Figura 10.8 a) e higrómetro eléctrico Neotek Humidímetro digital para madera. A la par de la toma de dimensiones de las secciones se fueron marcando los puntos en los elementos de madera en donde se colocaron los sensores de medición para obtener la velocidad en el sentido longitudinal y transversal radial de la madera (Figura 10.8 c).

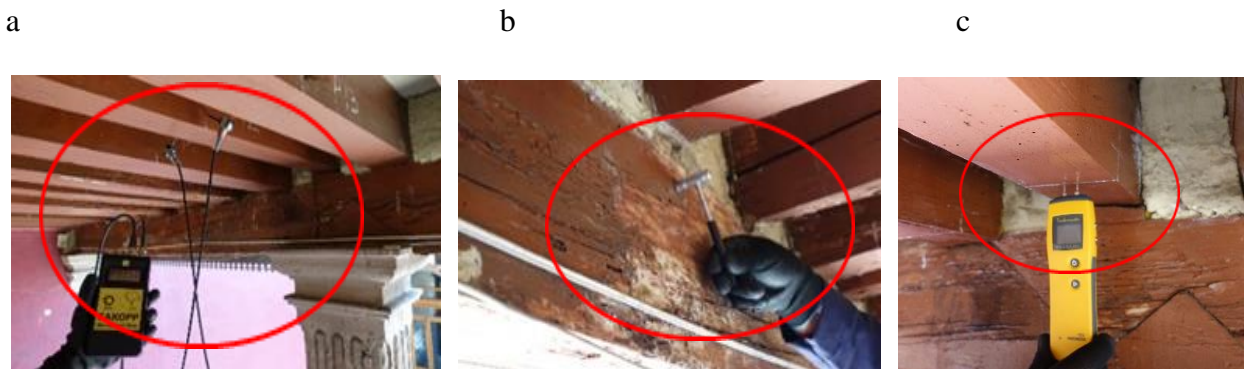


Figura 10. 8. Trabajos de toma de mediciones el en Pasillo 1 (Equipo Fakcopp empleando ondas de esfuerzo) (a), inspección visual en el pasillo 2 (b) mediciones del porcentaje de humedad en el pasillo 3 (higrómetro eléctrico) (c).

10.4. Material

Se analizaron 83 vigas de madera del género *Pinus*, este dato nos fue proporcionado por el personal del INAH, (proviene del archivo de esta institución en la cual se encuentran registrados los trabajos de mantenimiento y remodelación efectuadas anteriormente). Las vigas están

expuestas en tres de sus caras al ambiente de exterior. Se estima que su periodo de servicio fue de 50 años aproximadamente según los datos proporcionados. Las vigas presentaban un deterioro importante en los extremos próximos al patio (el pecho-paloma de la cornisa superior circundante como los botaguas no fueron suficiente protección para las cabezas de las vigas).

10.5. Contenido de humedad y densidad

El contenido de humedad de la madera se midió de igual forma para los tres pasillos que rodean el patio, esto con la finalidad de conocer el estado actual tanto de las más recientemente colocadas como de las que no fueron remplazadas en la última intervención (Figura 10.9). La densidad aparente en viguería en uso puede ser obtenida por medio de resistrometros para madera o por medio de la extracción de una pequeña muestra de 1 pulgada de profundidad y 1 de diámetro, esta extracción es equivalente a un pequeño nudo y no afecta a la capacidad de carga (Cestari *et al.*, 2010).

En este caso no fue posible de obtener una muestra debido a los criterios de manejo de las estructuras de madera del propio instituto, el dato fue tomado de bibliografía existente basándose en los datos proporcionados del INAH referentes al origen y tipo de madera (Íñiguez, 2005).

10.6. Pruebas de ondas de esfuerzo

Los tres grupos de vigas se consideraron como tres muestras independientes. Las variables de respuesta de cada muestra fueron el contenido de humedad (H) y la velocidad de onda (v) en la direccione radial-transversal (R_T). Los tiempos de transmisión de la onda se midieron con el aparato Fakopp en la dirección trasversal radial de las vigas en los mismos puntos donde se midió el contenido de humedad. El equipo emplea una frecuencia de emisión de la onda acústica (23 kHz) por excitación mecánica mediante un golpe sobre uno de los sensores (Carrillo, *et. al.*, 2019).

Este tipo de equipo se emplea en las evaluaciones de los árboles en el bosque o plantaciones. Esta herramienta proporciona mediciones de la velocidad acústica, que se ha demostrado que se relacionan directamente con una importante propiedad de la madera (Carballo, *et. al.*, 2009). Cuando se habla de las propiedades mecánicas sólo se habla de dos direcciones, la dirección paralela a las fibras (que coincide con la longitudinal) y la dirección perpendicular a las fibras (que engloba a la tangencial y radial, cuyas propiedades mecánicas suelen tener valores similares) (Schimleck, *et. al.*, 2019; COFAN, 1999; Kollmann, 1999). La velocidad de onda se calculó con la relación distancia/tiempo de transmisión (Vazquez, *et. al.*, 2015; Chen y Guo, 2017) en 5 puntos a lo largo de cada una de las vigas como se muestra en la figura 10.9.

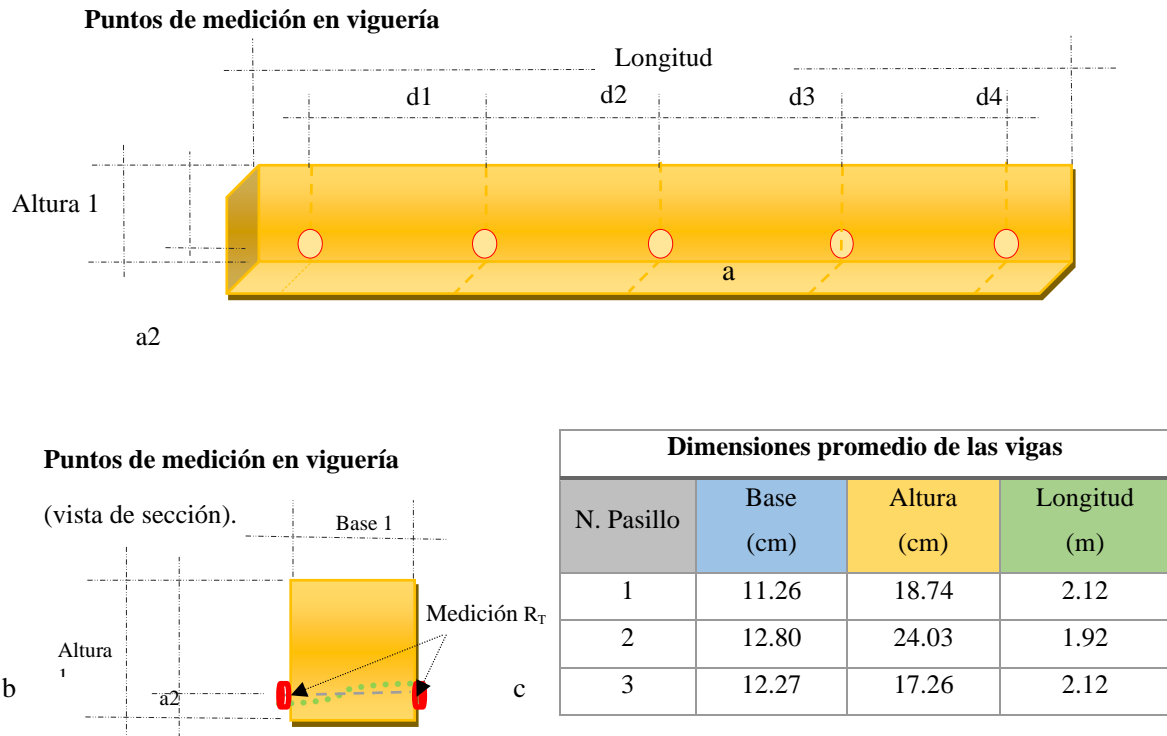


Figura 10. 9. Dibujo esquemático de la posición de las puntas de medición del Equipo Fakopp en los pasillos 1, 2 y 3 para la dirección longitudinal (a), dimensiones promedio de las vigas de los pasillos 1, 2 y 3 b) y dibujo esquemático de la posición de las puntas de medición del Equipo Fakopp en los pasillos 1, 2 y 3 para el sentido de medición transversal-radial (c).

10.7. Resultados y Discusión para el Caso 1

Frente al agua la madera sufre de hinchazón y contracción (Vazquez, *et. al.*, 2015). La medida del contenido de humedad de la madera es imprescindible para una adecuada utilización del material. La determinación del contenido de humedad en una misma viga puede presentar variaciones de humedad entre distintos puntos de la sección, cuanto más alejados del exterior de la sección, mayor será el contenido de humedad (Carrillo, *et. al.*, 2019).

La humedad en los 3 pasillos denota la existencia de problemas de filtración en la azotea, los cuales están afectando ya al interior de las vigas al estar absorbiendo humedad. Al graficar los puntos de medición de cada viga es posible identificar las zonas de riesgo que concuerdan con los resultados de la Velocidad Longitudinal y el Módulo de Young.

Planta Arquitectónica esquemática del área del patio central y graficas del porcentaje del contenido de humedad en los pasillos 1, 2 y 3.

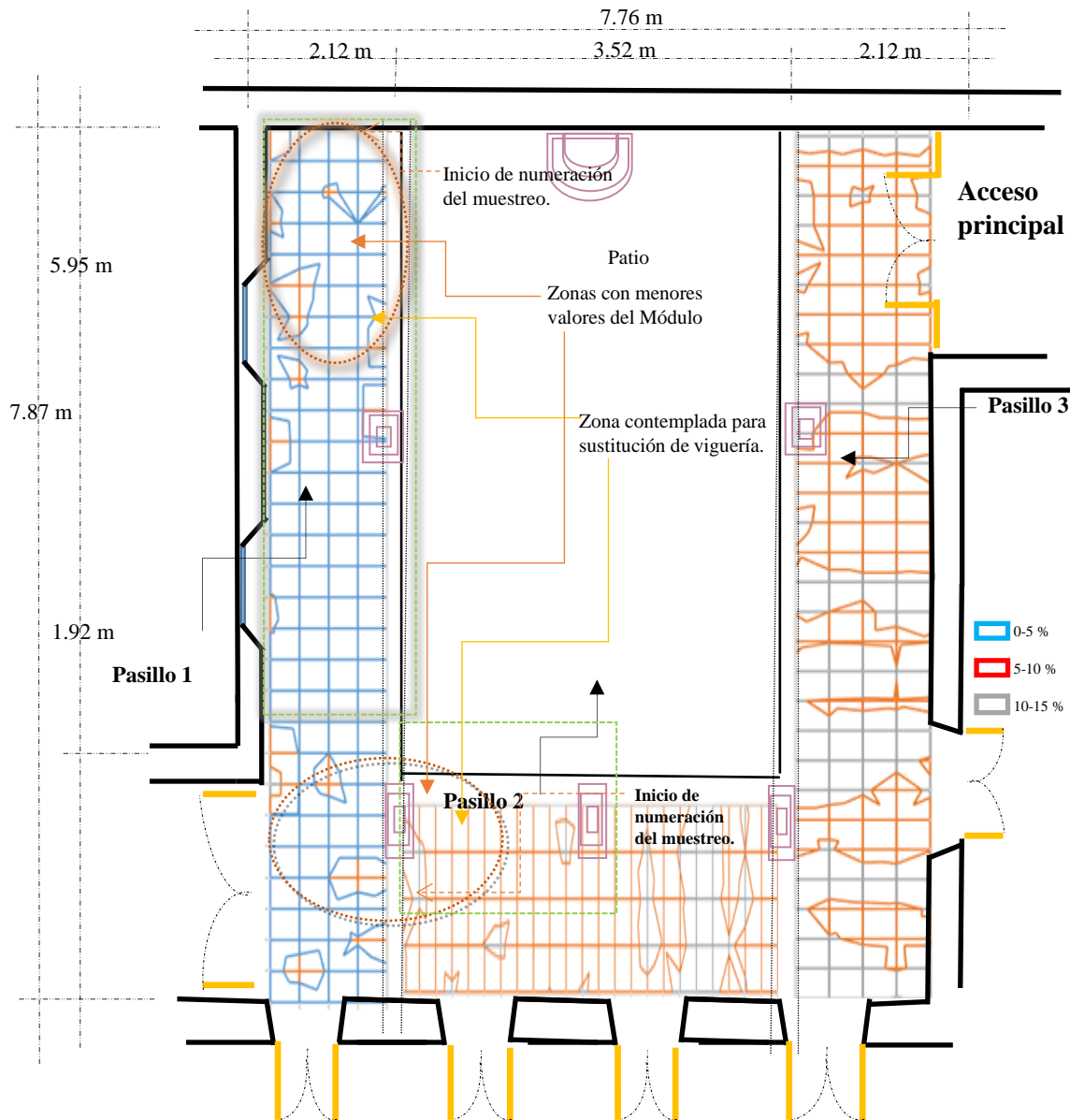


Figura 10. 10. Dibujo esquemático de la Planta Arquitectónica del área de medición del patio central y porcentaje de Contenido de Humedad para cada uno de los pasillos 1, 2 y 3.

En la Figura 10.10 se observa en porcentaje de contenido de humedad a lo largo de cada una de las vigas (vista en planta de la localización de cada una de las vigas de los tres pasillos).

Los porcentajes de contenido de humedad fueron más altos en el pasillo 3 el cual presento algunas zonas con picos más elevados en tres de las vigas, en tanto que el promedio más bajo lo presento el pasillo 2, en tanto el pasillo 1 sus valores fueron más estables (ver figura 10.11).

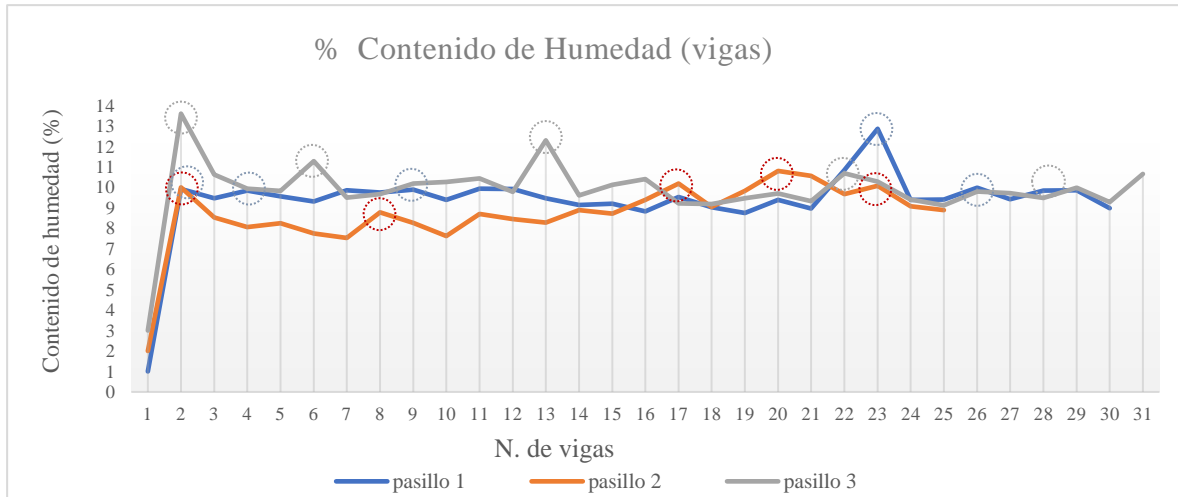


Figura 10. 11. Promedio del porcentaje de humedad en cada una de las vigas de los pasillos 1, 2 y 3.

En lo referente a la Velocidad Longitudinal se observó que la técnica utilizada es sensible al estado que guardan las vigas del caso de estudio. La propagación de la velocidad longitudinal en el sentido de medición R_T en las vigas del pasillo 1 presenta valores más altos que la mitad analizada del pasillo 2, en ambos se observó que había caídas de los valores en ciertas vigas (Figura 10.12).

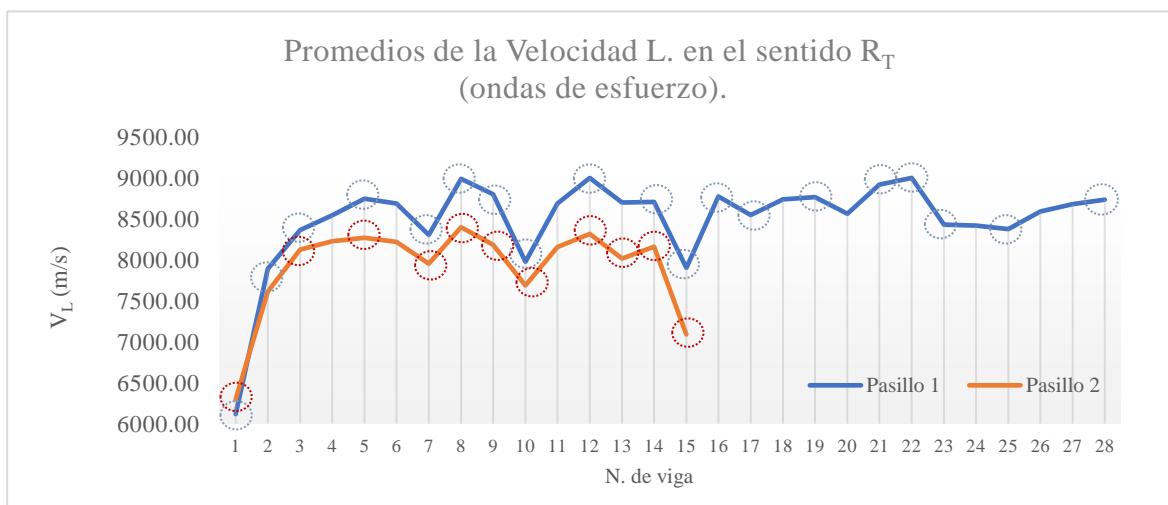


Figura 10. 12. Promedio de la velocidad (R_T) en las vigas de los pasillos 1 y 2.

En los valores del Módulo de Young se observó que ambos pasillos presentan vigas con valores bajos que coinciden con los valores obtenidos de la velocidad longitudinal los cuales resultan menores a los recomendables en maderas de reciente corta (ver tablas 6.1-6.4). también es importante considerar que estos valores están tomados en maderas con un alto contenido de humedad, a diferencia de los valores de las tablas del apartado 6 los cuales fueron calculados en condiciones óptimas según las normas que cada autor empleo para la realización de las mismas.

La densidad también es otro factor que está influenciando en los resultados de la medición del Módulo de Young ya que esta se calculó a partir de datos bibliográficos (madera de reciente corta en condiciones óptimas de laboratorio) debido a la falta de material de muestreo. Con las condiciones antes nombradas se encontró que a partir de la viga 1 a la 15 en ambos pasillos se ve un comportamiento semejante en el deterioro de las vigas siendo la zona más crítica este rango de vigas (ver figura 10.13).

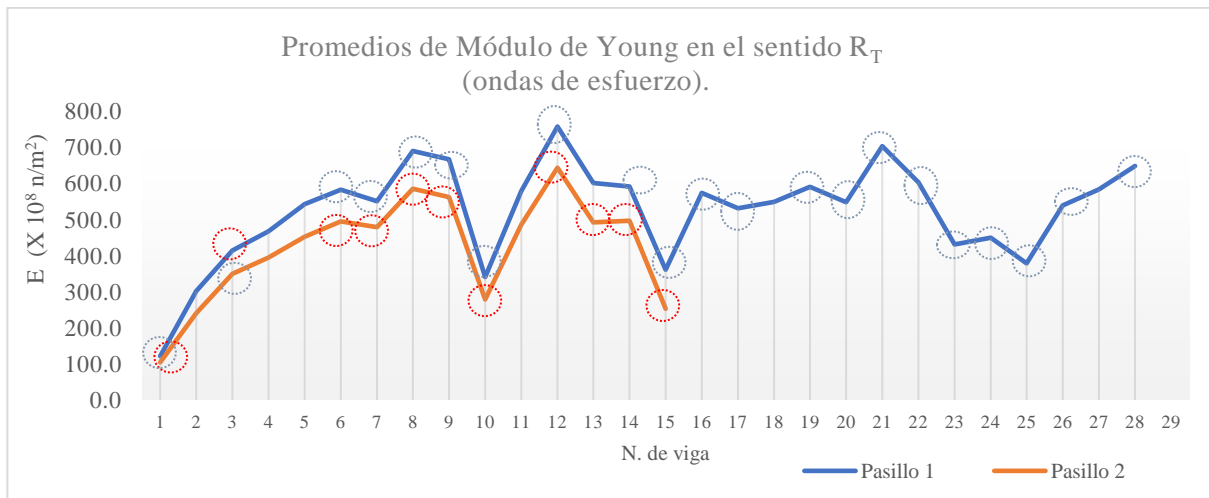


Figura 10. 13. Promedio del Módulo de Young (R_T) en las vigas de los pasillos 1 y 2.

10.8. Conclusiones Caso 1

Este tipo de diagnósticos previos a una intervención son importantes para realizar una planeación sobre las estrategias de actuación en lo referente al cambio de vigería, tanto en la cantidad de nuevo material a adquirir como la posibilidad de hacer reubicaciones de las existentes.

Es importante efectuar un muestreo poco invasivo a las piezas (cuando así se autorice por las personas encargadas de salvaguardar el inmueble) para poder hacer los cálculos del Módulo de Young lo más apegados a la realidad ya que la mayoría de las normas para madera no contemplan a la madera de recuperación.

La medición del Contenido de Humedad, de la Velocidad y del Módulo de Young, permiten confirmar de una manera instrumentada los datos obtenidos de la inspección visual que concuerdan con las marcas tanto en el cielo raso como en las vigas de la aparición de hongos, rasgaduras, ataque de termitas y pudrición de la madera. Se identificó una zona crítica que con la inspección visual primaria no había sido considerada como de riesgo mayor, las que comienzan a estar en riesgo y las que están estables.

Es posible notar como la humedad está afectando las características internas de las vigas. Aparentemente las variaciones en los valores de la velocidad y del Módulo de Young son en algunas vigas independientes de las zonas con mayor contenido de humedad. La mayoría de las vigas del pasillo 1 y de la mitad del pasillo 2 necesitan ser sustituidas debido a sus malas condiciones, algunas presentaron valores dentro de los rangos permisibles de seguridad. Pero, las condiciones que presentan las cabezas de algunas de las vigas que están expuestas hacia el patio han perdido área en su perfil o están demasiado degradadas como para seguir soportando las cargas a las que están sometidas.

Se recomienda de manera general la realización de trabajos de impermeabilización en las azoteas del edificio y continuar con el monitoreo del porcentaje de humedad en las vigas, ya que existen filtraciones de agua. Deberían de ser sustituidas las vigas que presentaron Módulos de Young menores y las que perdieron sección en sus cabezas y valor la reubicación de algunas vigas que aún se encuentran en condiciones de seguir en servicio.

11. Caso 2

Entre los edificios que integran el patrimonio artístico de la ciudad de Morelia resalta en primer lugar la Catedral Metropolitana de Morelia ubicada en la capital del estado de Michoacán, México (1660 a 17449). Fue diseñada por el arquitecto italiano Vicencio Barroso de la Escayola, en un estilo que los expertos han tipificado como Barroco Tablerado. Está dedicada a la Transfiguración del Señor, la administración virreinal y la propia jerarquía eclesiástica novohispana llegaron a considerarla como el más ambicioso proyecto del territorio colonial para esa centuria, ver figura 11.1 y 11.2, (González, 2006).

11.1. Antecedentes

El obispo y los capitulares michoacanos proyectaron hacia 1765, integrándose al muro poniente del templo, el edificio donde tendrían lugar las actividades administrativas de la regulación diocesana. Identificada como La Mitra, esta construcción albergaría las oficinas de la secretaría del gobierno eclesiástico, la sala del tesoro y las dependencias correspondientes al archivo; a través de sus sólidos muros, de la cúpula elíptica que corona la escalera y de la arquería de dos niveles que define la fachada (Aguilera, 2016).

a Catedral Metropolitana de Morelia b



c
área de intervención



d



Figura 11. 1. Catedral Metropolitana de Morelia y del edificio de La Mitra, fachada principal (a), pasillo de acceso al área de intervención (b), interior del área de archivo (c) y área de la azotea intervenida (d).

Desde el punto de vista holístico, se debe satisfacer el requerimiento de resistencia estructural; es decir, las características de las vigas nuevas deben ser equivalentes con las de las vigas desmontadas (Sousa *et al.*, 2016).

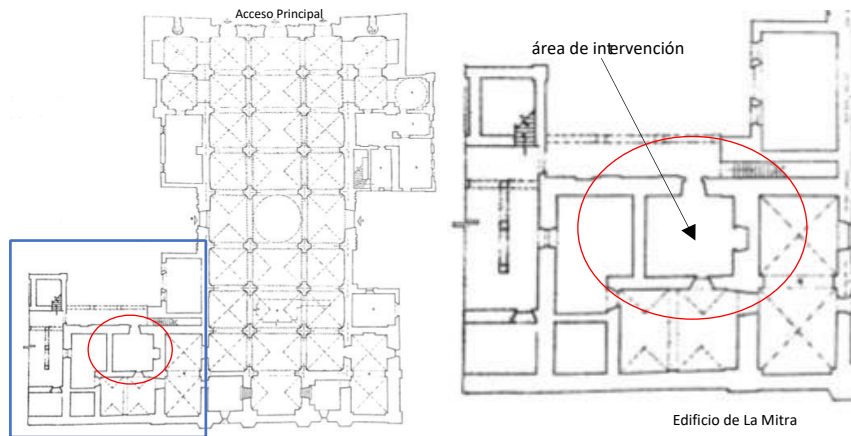


Figura 11. 2. Planta arquitectónica de la Catedral Metropolitana de Morelia y del edificio de La Mitra. Tomada del expediente enviado a la UNESCO para inscribir al Centro Histórico de Morelia en la Lista del Patrimonio Cultural de la Humanidad, 1990. Copia resguardada por el Archivo Histórico Municipal de Morelia. (Aguilera, 2016).

Es en esta área de la Catedral conocida como La Mitra en donde durante los trabajos de restauración una habitación de la sala capítular se diagnosticó como deplorable el estado de las vigas de madera que sostienen el entramado del techo de un salón de sus oficinas. En consecuencia, se procedió a su remplazo por vigas de aserrado reciente (ver figuras 11.3- 11.9).

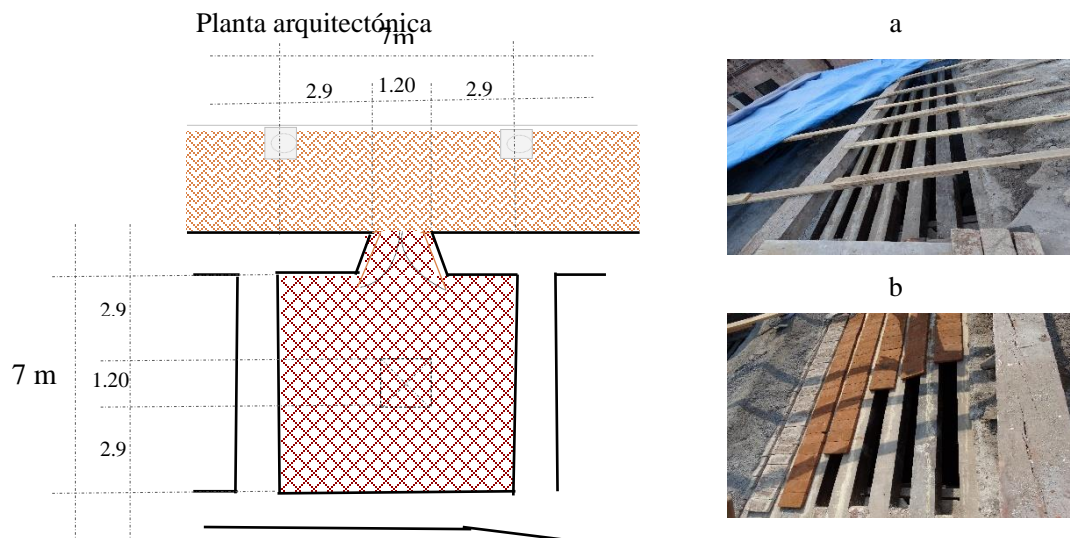


Figura 11. 3. Planta arquitectónica del área intervenida en la rehabilitación del edificio de La Mitra, vigas de madera recuperada (a) y vigas de madera de reciente corta (b).

11.2. Inspección

Una estrategia en los trabajos de restauración de techos de madera en edificaciones históricas es la sustitución de las vigas en uso, por elementos estructurales equivalentes, de madera recién aserrada de la misma especie, que cuenten con la calidad y resistencia mecánica de las vigas por sustituir (Croatto y Turrini, 2014). Esta reconstrucción de carácter técnico requiere el rigor conveniente para garantizar la seguridad del usuario y la estabilidad de la edificación, respetando los aspectos estéticos y ambientales del maderamen (Worthing y Dann, 2000).

Como resultado de los trabajos de mantenimiento de la Catedral Metropolitana de Morelia, fue necesario el cambio de vigería de una de las áreas del edificio de la Mitra en el segundo nivel, esto por la presencia de humedad que afecto a las condiciones de la vigería de madera. Por esta razón fue necesario retirar el enterrado de esta zona y la sustitución de las vigas. A nuestra llegada a la obra los trabajos ya habían comenzado encontrando el sitio como se observa en las imágenes de la figura 11.4 a, b, c y d en la azotea y en el interior como lo muestran las imágenes 11.4 e y f.

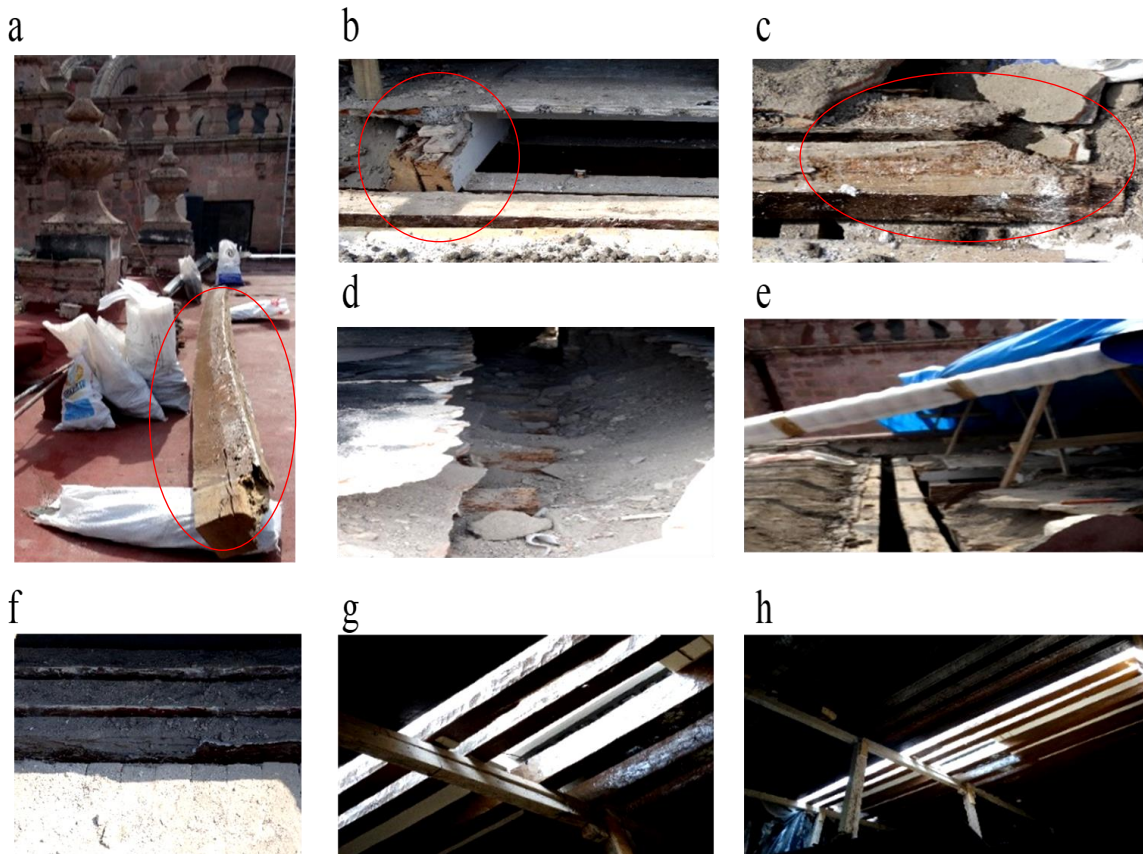


Figura 11. 4. Condiciones de la vigería en los trabajos de mantenimiento de la Catedral Metropolitana de Morelia (a, b, c, d, e, y f trabajos de remoción del terrado y vigería visto desde la azotea, g y h vista de la vigería al interior del inmueble).

De la madera que se retiró se encontró que presentaban un notorio desgaste en las cabezas (ver figura 11.5 a, b y c) al momento de retirar el terrado. En este caso no era visible el grado de deterioro de las vigas en sus zonas medias, pero si en los lugares donde estas se apoyan en los muros, así que se clasificaron como Madera de Recuperación.



Figura 11. 5. Condiciones de las cabezas de las vigas de la Catedral Metropolitana de Morelia (a, vigería sin terrado, b y c vigería retirada).

Existen otras vigas de esta misma área las cuales en el momento en que comenzamos a registrar el avance de los trabajos de mantenimiento ya habían sido retiradas y que por sus condiciones fueron clasificadas en otro grupo, como lo muestran las imágenes de la figura 11.6 a, b, c, d, e y f.



Figura 11. 6. Condiciones de las cabezas de las vigas de la Catedral Metropolitana de Morelia (b, c, d, e y f vigería con posibilidades de ser reutilizada, a y b madera en pésimas condiciones fracturada al ser retirada).

En estas vigas es claro observar que no solo en los extremos estaban en mal estado si no también la parte superior, que en algunos casos muestran la presencia de haber estado en contacto con el agua que se filtraba por el terrado (ver figura 11.6 e). Algunas otras vigas al momento de ser retiradas sufrieron un colapso fracturándose en dos o más trozos como se observa en las imágenes de la figura 11.6 a y b.

11.3. Material analizado *in situ*

El material resultante de la sustitución en los elementos de madera (vigas extraídas durante los trabajos de restauración del techo de la sala capitular de la Catedral de Morelia), estos se clasificaron en tres grupos de forma general por medio de la técnica de inspección visual.

El primer grupo fueron las vigas que presentaban prácticamente solo daño en las zonas de las cabezas. El segundo grupo presentaba también este daño, así como también presentaban un pandeo en su zona central y grietas derivadas del esfuerzo de carga. Finalmente, el tercer grupo presentaba las lesiones de los dos grupos anteriores, pero de una forma más notoria en las vigas de este grupo que no se seccionaron en más de dos o tres trozos.

De estos tres grupos se analizaron cinco vigas pertenecientes al primer grupo el cual contaba con 20 piezas (se considera a estas vigas como madera de recuperación, (ver figura 11.7 y 11.8 a) y se compararon con cinco vigas nuevas (madera de resiente corta) de madera del género *Pinus*, (ver figura 11.8).

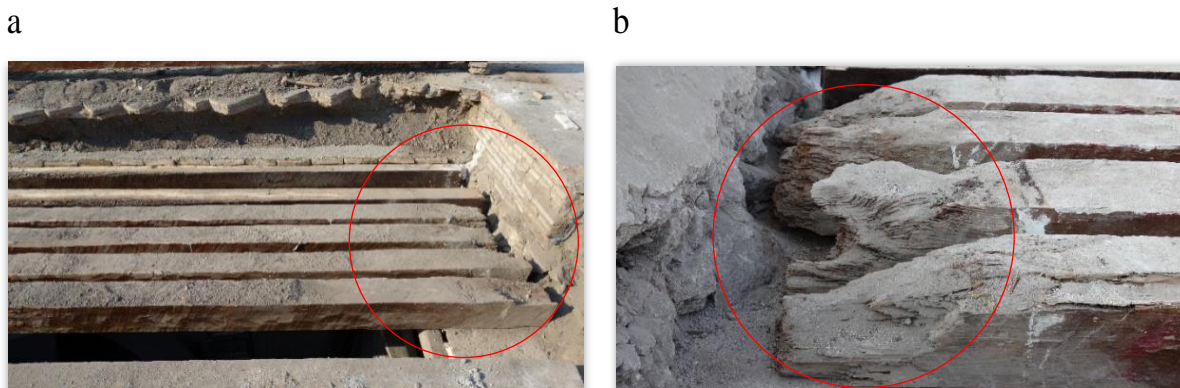


Figura 11. 7. Deterioro en los extremos de las vigas (vigas al momento de estar siendo retiradas a y condiciones de las cabezas de las vigas b).

El género de la madera se identificó a nivel macroscópico en el 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. Las vigas nuevas (fueron adquiridas en aserraderos del estado de Michoacán, México).

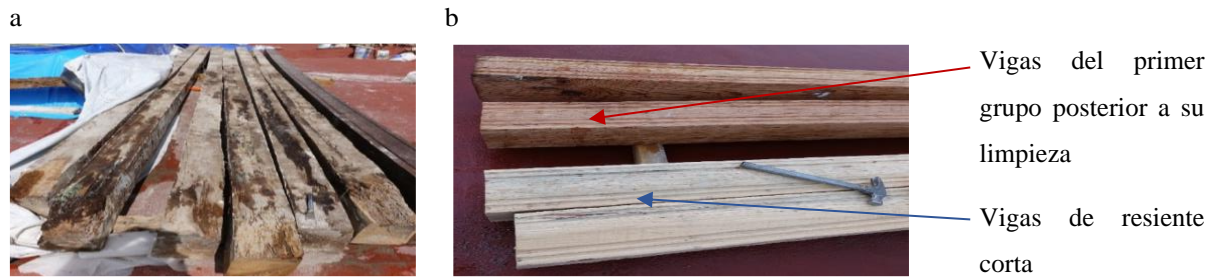


Figura 11. 8. Vigas del primer grupo al momento de estar siendo retiradas y clasificadas (a), vigas del primer grupo posterior a su limpieza y vigas de resiente corta (b).

Para facilitar la identificación y clasificación de los grupos de Vigas analizados por medio de Métodos no Destructivos *in situ* y en laboratorio, a partir de este apartado se nombraran como:

A la **Madera de Recuperación del Primer Grupo clasificado *in situ***, por medio de inspección visual se le nombro como; **Madera Deteriorada**, esto debido a que el material de donación para los análisis de laboratorio pertenece a las zonas de las cabezas de las vigas las cuales presentan una mayor degradación en comparación con el resto de las vigas.

El grupo de **Madera de Reciente Corta** se nombró **Madera Sana**, dado que estas vigas fueron cortadas y seleccionadas como madera de primera calidad libres de defectos y con un hilo alineado al corte. En lo subsecuente los subíndices R, T y L se refieren a las direcciones radial, tangencial y longitudinal con sus respectivas combinaciones dependiendo del ángulo de medición R_T , R_L , T_R , T_L , L_R y L_T , tanto para el Caso 2 como para el Caso 3.

11.4. Material empleado para el análisis de Ondas Ultrasonicas y Análisis del Contenido de humedad para ambos grupos de madera *in situ*.

Se trabajó con madera de pino proveniente de vigería de madera de recuperación, las cuales estuvieron en uso en el área de archivo del edificio de La Mitra de la ciudad de Morelia, México y con madera sana de reciente corta del género *Pinus*, esta última no sufrido deformaciones físicas causadas por esfuerzos mecánicos ni ataques biológicos siendo considerado como nuestro testigo.

Las vigas que se retiraron (madera de recuperación) estuvieron expuestas en tres de sus caras al ambiente interior del edificio y se estima que su periodo de servicio fue de más de 100 años. Tenían un deterioro importante en los extremos que estuvieron empotrados (zona de las cabezas de las vigas) de tal forma que las observaciones se realizaron en el segmento central con madera libre de deterioro, (Figura 11.9).

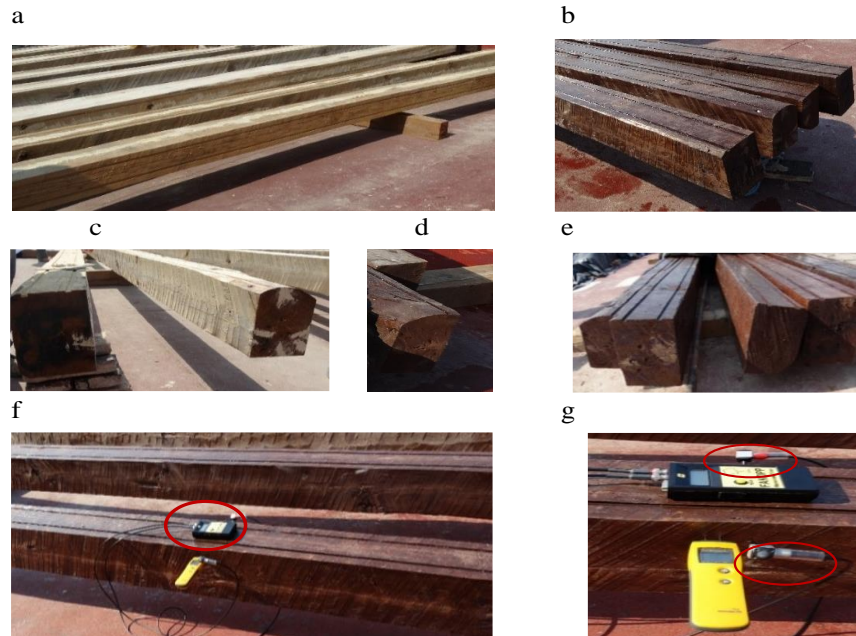


Figura 11. 9. Vigas nuevas (a, b, c, d y e) siendo evaluadas antes de ser colocadas (f y g).

El contenido de humedad de las vigas de madera sana fue el alcanzado por el tratamiento de secado. En cambio, el contenido de humedad de las vigas deterioradas (madera de recuperación) representa el contenido de humedad en equilibrio logrado durante el tiempo de servicio de la estructura en el techo interior. Una vez instaladas, las vigas nuevas (madera sana) alcanzarán el contenido de humedad en equilibrio para la madera expuesta al interior de un salón en la Catedral de Morelia. El plan de muestreo para las mediciones del contenido de humedad y de la velocidad de onda *in situ* se realizó como se presenta en la figura 11.10.

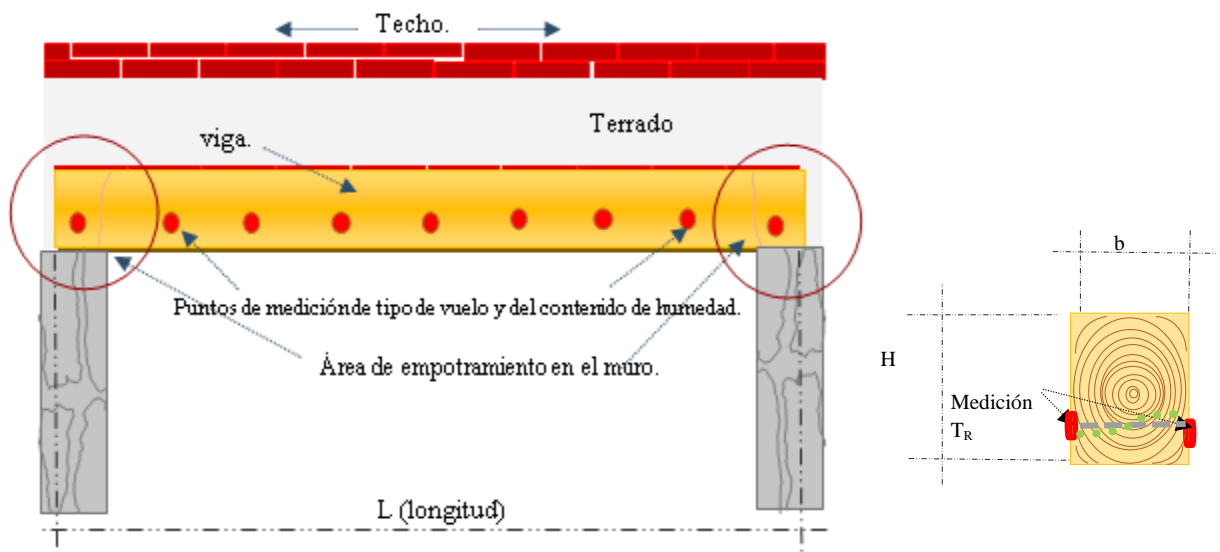


Figura 11. 10. Estrategia de muestreo para mediciones de velocidad de onda y contenido de humedad.

11.5. Material empleado para el Análisis Ultrasonico en laboratorio y para las mediciones de birrefringencia para el Caso 2

Se trabajó con la madera de pino proveniente de las cabezas de las vigas de madera de recuperación, (área de archivo del edificio de La Mitra) y con los recortes de ajustes de longitud de las vigas de madera sana de reciente corta (cabezas de las vigas), del género *Pinus*, libres de defectos, de deformaciones físicas sin ataques de tipo biológico siendo considerado como nuestro testigo. Para los dos tipos de muestras de madera, se seleccionaron las áreas adecuadas para la inspección por ultrasonido, dando como resultado cubos de 30 mm. Se realizó su identificación, clasificación y orientación para cada una de las muestras de madera. Teniendo en cuenta que las mediciones de ultrasonido se llevarían a cabo en las tres direcciones principales de la madera (Longitudinal, Radial y Tangencial) como se muestra en la figura 11.11.

El tamaño de muestra para las pruebas de Onda Ultrasonica fue determinado principalmente por el tipo de transductores empleados para la medición. Así se obtuvieron 35 probetas de cada una de las cinco vigas sanas y de las cinco vigas deterioradas con dimensiones de 3.0 cm x 3.0 cm x 3.0 cm (Raposo *et al.*, 2017).

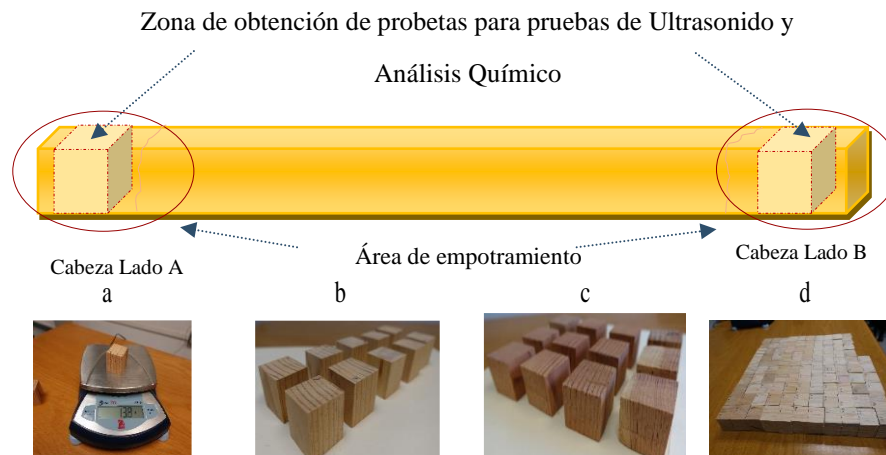


Figura 11. 11. Diagrama de obtención de las probetas de madera sana y madera deteriorada empleadas en las mediciones de Ultrasonido y análisis químico, medición de peso de probetas (a), probetas de madera sana (b), probetas de madera deteriorada (c) y grupo de probetas de madera deteriorada de la viga 1 (d).

Los cubos se prepararon para obtener superficies lisas por medio de un lijado el cual se realizó con cuidado debido a la naturaleza frágil de los cubos. Para la realización de las mediciones se tuvo cuidado de mantener las muestras de madera a una humedad relativa constante del 20% y a temperatura ambiente de aproximadamente 27°C.

Estas presentan afectaciones como esfuerzos de cargas, imperfecciones causadas por defectos naturales y agentes biológicos, así como los defectos naturales provenientes de su uso en obra (densidad y contenido de humedad).

11.5.1. Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad de las probetas para análisis de Ultrasonido

La densidad aparente de la madera se determinó con la relación peso/volumen de 35 probetas con dimensiones de 3.0 cm x 3.0 cm x 3.0 cm (Raposo *et al.*, 2017). recortadas de las diez vigas en estudio. Para aligerar el texto, en lo subsecuente, la “densidad aparente” de la madera se escribirá “densidad”. El contenido de humedad de la madera se midió con un higrómetro eléctrico (Dietsch *et al.*, 2015) en los mismos sitios donde se midieron los tiempos de transmisión de onda.

11.6. Material empleado para el análisis anatómico microscópico de la madera del Caso 2

Para la realización del análisis anatómico microscópico del material del Caso 2, se seleccionó material del área de las cabezas de las vigas 1, 2 y 3 tanto de la madera deteriorada como de la madera sana. Se realizaron tres cubos para cada una de las 6 vigas seleccionadas. Las preparaciones de las muestras para el Microscopio Electrónico de Barrido fueron cortadas en forma de cubos de 8 x 8 x 8 mm. Los cuales provienen del área empotrada de las cabezas de las vigas 1,2 y 3, tanto del material retirado como del nuevo (Ver figura 11.12).

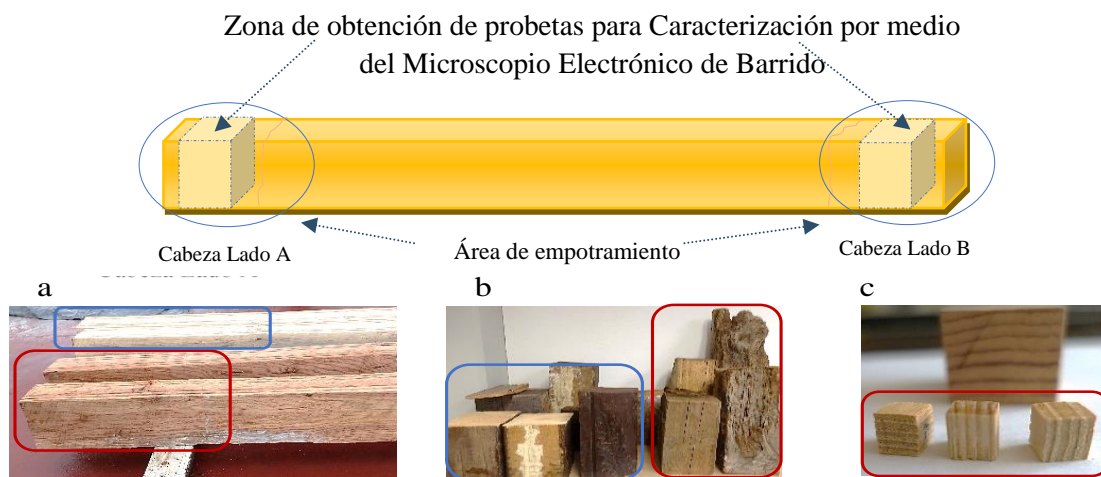


Figura 11. 12. Diagrama de obtención de las probetas de madera nueva y deteriorada empleadas en las mediciones de ultrasonido. a cabezas de vigas nuevas (recuadro azul) y deterioradas (recuadro rojo), b secciones de vigería proveniente de la vigería nueva (recuadro azul) y deteriorada (recuadro rojo), c muestras para microscopio electrónico de barrido (recuadro rojo).

Los 3 cubos presentan caras en cortes Longitudinal Radial, Longitudinal Tangencial y Trasversal (Ver figura 11.12 c), debido a las características de observación del microscopio y para una mejor caracterización solo se analiza una cara de cada uno de los cubos (no deben ser de albura ni de madera próxima a la medula (García 2002). Los cubos se sometieron a un proceso de ablandamiento por medio de ebullición a presión atmosférica y glicerina para realizar los cortes.

11.7. Material empleado para la caracterización química

Se analizaron cinco vigas nuevas (sanas) y cinco vigas viejas (deterioradas) de madera del género Pinus. El género de la madera se identificó a nivel macroscópico en el 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.

Las vigas deterioradas fueron seleccionadas del conjunto de veinte vigas extraídas durante los trabajos de restauración del techo de la sala capitular de la Catedral de Morelia (ver figura 11.23). Las vigas nuevas (sanas) fueron adquiridas en aserraderos del estado de Michoacán, México. El material se obtuvo de los cortes de las cabezas de las vigas 1, 2, 4 y 5 deterioradas las cuales se dividieron en tres áreas como lo indica la figura 11.13 a, basándose en el grado de deterioro de estas, de la cual se obtuvieron muestras representativas de la zona del duramen y de la albura (ver figura 11.13 b y c).

El material obtenido fue astillado, secado al aire y molido en un equipo Wiley. La harina obtenida se clasificó con tamices, para el análisis químico se empleó la fracción que pasó por la malla 40 (425 μ m) y que fue retenida en la malla 60 (250 μ m). Posteriormente se determinó el porcentaje de humedad por el método de deshidratación a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ de acuerdo con T 264 cm-97 (TAPPI, 2000). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

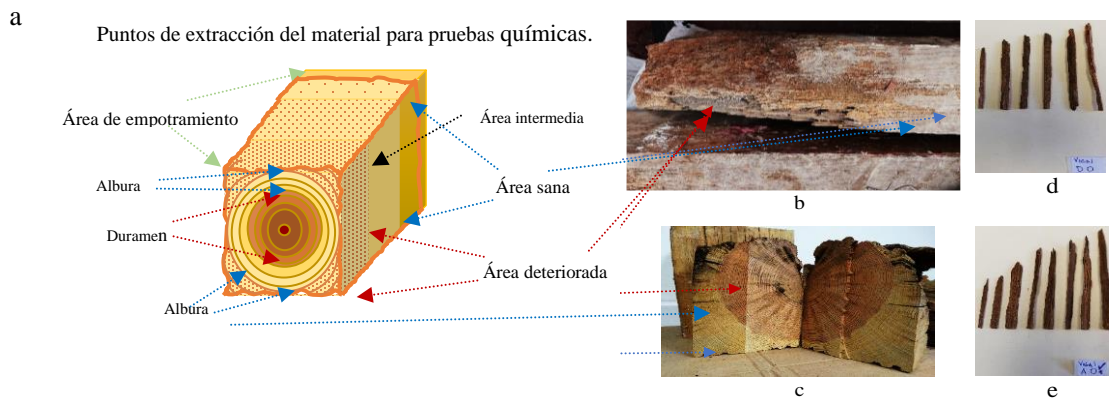


Figura 11. 13. Diagrama de las zonas de extracción del material para pruebas químicas (a), estado del material para análisis (b), corte de viga donde se observa la albura y el duramen (c), astillas de duramen deteriorado (d) y astillas de albura deteriorado (e).

El material obtenido fue astillado, secado al aire y molido en un equipo Wiley. La harina obtenida se clasificó con tamices, para el análisis químico se empleó la fracción que pasó por la malla 40 (425 μm) y que fue retenida en la malla 60 (250 μm). Posteriormente se determinó el porcentaje de humedad por el método de deshidratación a $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ de acuerdo con T 264 cm-97 (TAPPI, 2000). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Todas las muestras se analizaron y clasificaron por áreas de albura y duramen en sus zonas sanas y deterioradas, obteniendo las siguientes nomenclaturas que a partir de este momento se nombrarán albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd).

11.8. Metodología para las mediciones *in situ* por medio de Ondas de Esfuerzo

La estrategia experimental de esta investigación consistió en analizar viga por viga una muestra representativa del entramado del techo (Cestari et al., 2010; Branco et al., 2017). En este estudio de caso, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y a la comparación de dos muestras representativas de madera aserrada originaria de árboles originarios de regiones ecológicamente similares. Para simplificar el análisis, se considera mínima la influencia del Intemperismo y las condiciones de servicio, a las que estuvo expuesta la madera de recuperación, (ver figura 11.14).

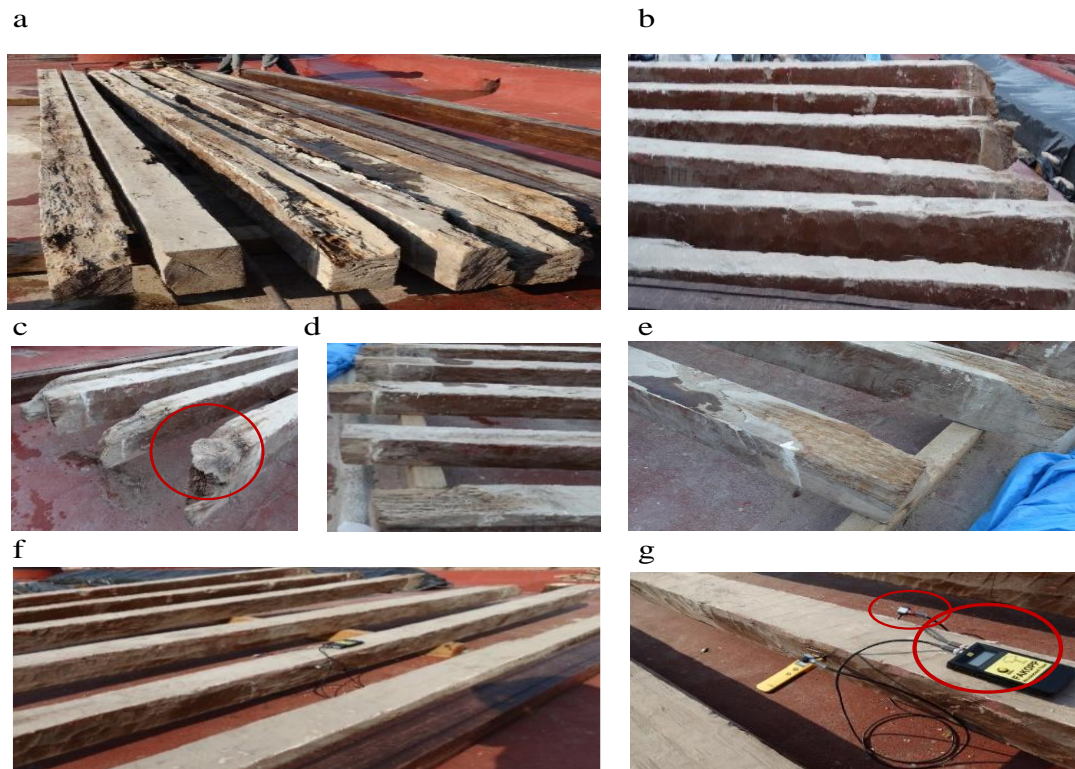


Figura 11. 14. Condiciones de las vigas de madera recuperada (deterioradas) (a, b, c, d y e) que se encontraban en el entramado del techo siendo evaluadas (f y g).

Por otro lado, se considera mínima la influencia de las características del crecimiento del árbol, de donde provienen los dos conjuntos de vigas en sus propiedades tecnológicas. Así, para el grupo de vigas de madera de recuperación, se estudió el segmento de la viga que no denota deterioro severo, correspondiente al segmento de la viga expuesto en el salón que no muestra deterioro, y se eliminaron los dos segmentos empotrados en los muros.

Asimismo, durante la experimentación, la temperatura y la humedad en la madera, se mantuvieron constantes y distribuidas espacialmente de manera uniforme. En el mismo contexto, con el objeto de simplificar el fenómeno y para interpretar las mediciones de la velocidad de onda, se excluyó el efecto del amortiguamiento de la onda mecánica y se idealizó como si viajara en una sola y única dirección.

Los tiempos de transmisión de la onda se midieron con el aparato *Fakopp*© (inspección emisión-transmisión), en las direcciones transversal (siete mediciones en $h/2$) y longitudinal (dos mediciones en $L/3$) de las vigas, el procedimiento de la metodología se observa en la figura 11.10 y la toma de lecturas.

La velocidad de onda se calculó con la relación distancia/tiempo de transmisión (Dackermann *et al.*, 2014; Sasaki *et al.*, 2014). Los promedios de las mediciones en una viga se consideraron para el análisis. El módulo de Young de las vigas se determinó adaptando los protocolos reportados por Kloiber *et al.* (2016) así como por Morales y Machado (2017) y se empleó la ecuación 22:

$$E = \rho_H \times v^2 \quad \text{Ecuación 22. Módulo de Young.}$$

Donde: E = Módulo de Young (N m^{-2})
 ρ_H = Densidad (kg m^{-3})
 v = Velocidad de onda (m s^{-1})

11.9. Metodología del empleo de Ondas Ultrasónicas en laboratorio

Las mediciones se tomaron en las direcciones longitudinal, radial y tangencial para todas las muestras se usaron transductores longitudinales. Las velocidades fueron medidas en las direcciones $L_L, L_T, L_R, R_R, R_L, R_T, T_T, T_L$ y T_R (ver figura 7.1) donde el primer subíndice indica la dirección de propagación de la onda ultrasónica y el segundo subíndice denota su polarización. De manera similar, la magnitud de los Coeficientes de Atenuación fue medidos en las tres direcciones ya mencionadas.

Por medio de la técnica de contacto (inspección emisión-transmisión) utilizando un par de transductores de onda longitudinal: V103 frecuencia 1.0 Mhz y diámetro elemento piezoeléctrico de 12.7 mm y un par de transductores de banda ancha de corte (V151-Panametrics) con una frecuencia central de 0,5 MHz y un tamaño de elemento de diámetro de 25,4 mm para inducir ondas ultrasónicas transversales. con el propósito de observar el comportamiento que tiene la onda ultrasónica dilatacional y corte con respecto a las diferentes muestras de los dos grupos de vigas (Chen, 2013).

El transductor ultrasónico se colocó en la muestra de madera y excitado por un receptor pulsador de alto voltaje Panametrics 55058PR. La señal ultrasónica fue digitalizada y promediada por un osciloscopio LeCroy Wavesurfer 432 y luego enviada a la computadora para el procesamiento de datos, ver figura 11.15.

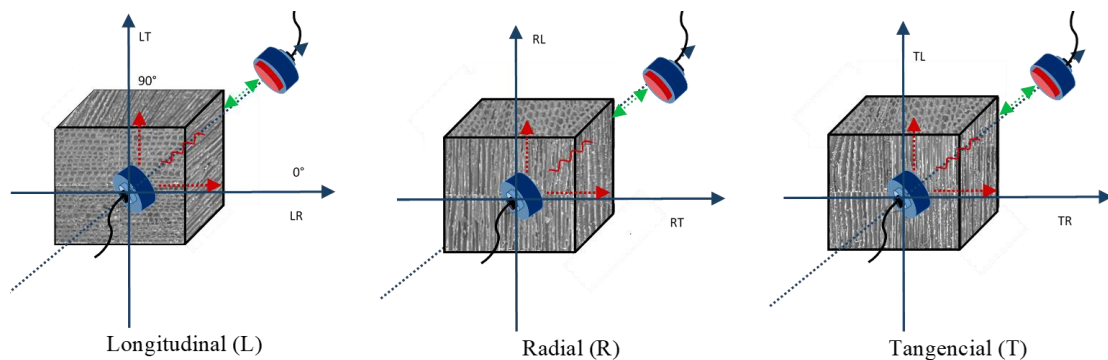


Figura 11. 15. Referencia de coordenadas seleccionada para las muestras de cubo de madera. Tenga en cuenta que la primera letra indica la dirección principal de la muestra de cubo de madera longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T) mientras que la segunda letra indica la dirección de polarización de la onda ultrasónica.

Durante la experimentación, la temperatura y la humedad en la madera se mantuvieron constantes y distribuidas espacialmente de manera uniforme. Las velocidades longitudinal y transversal ultrasónicas se calcularon midiendo el tiempo de viaje de las ondas ultrasónicas a través de las muestras de madera deteriorada y madera sana. Para evadir la amplitud no uniforme en el campo cercano del transductor, se usó una barra de amortiguación (sílice fundida) para agregar un retraso de tiempo entre el pulso de excitación y los ecos que regresan de la muestra medida (Carrillo y Carreón, 2019).

En la figura 11.16 y 11.17 se muestran los esquemas de los procedimientos de medición de las probetas de madera sana y madera deteriorada. Se determinó la velocidad y la atenuación ultrasónicas, esto con la finalidad de obtener el Módulo de Young y de Cortante de las distintas muestras de madera.

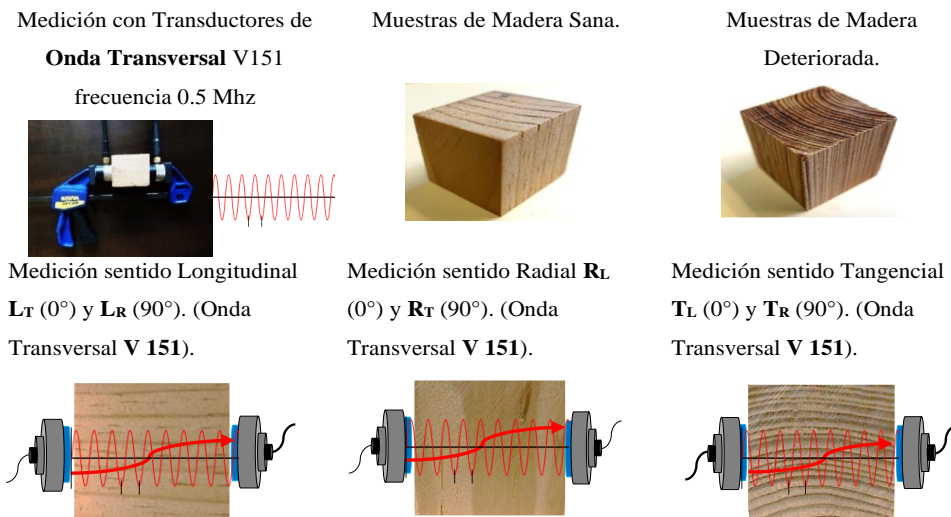


Figura 11. 16. Dibujos esquemáticos de las formas de medición con la onda longitudinal de las muestras de la madera.

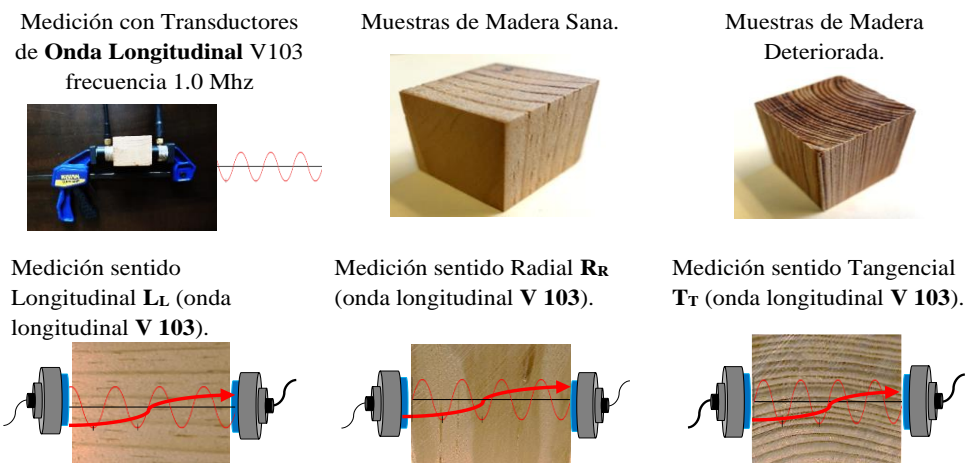


Figura 11. 17. Dibujos esquemáticos de las formas de medición con la onda transversal de las muestras de la madera.

11.10. Determinación de la Anisotropía Acústica para el Caso 2 para la Madera Sana y la Madera de Recuperación Deteriorada

El parámetro de anisotropía acústica para madera de pino mexicano deteriorada y madera sana se calculó mediante la técnica de transmisión de emisiones ultrasónicas. Las mediciones experimentales se llevaron a cabo utilizando un transductor ultrasónico de onda cortante con una frecuencia central de 0.5 MHz. Se realizaron datos de velocidad ultrasónica y microscopía electrónica de barrido (SEM), estableciendo una correlación directa con la onda de velocidad de corte y la acústica anisotrópica en la madera con un envejecido natural resultado del uso (madera de recuperación) y una madera sana (resiente corta).

Debido a problemas ecológicos y ambientales, con frecuencia las propiedades generales de un compuesto natural como la madera pueden experimentar cambios importantes relacionados con su estructura. Por ejemplo; el envejecimiento de la madera se conoce como la modificación inevitable (descomposición) de las propiedades físicas y mecánicas de un material en el curso de un almacenamiento o uso extensivo debido a las influencias ambientales (Riggio, 2018; Cavalli, 2016; Green, 1999).

Los efectos de degradación más comunes son los organismos destructores de la madera, la fotodegradación, la meteorización o la carga a largo plazo. Durante el proceso de descomposición de la madera, se presenta una importante cantidad de masa, rigidez y pérdida de resistencia. Como resultado, es necesario monitorear el proceso de descomposición de la madera para garantizar los requisitos estructurales y de seguridad. Por lo tanto, la caracterización incluye el material (madera) y las características estructurales. La madera tiene una estructura jerárquica desde la escala molecular hasta la macroscópica; árbol (m), anillo anual (cm), células (mm), paredes celulares (μm), fibrillas (nm) como se muestra en la figura 11.18.

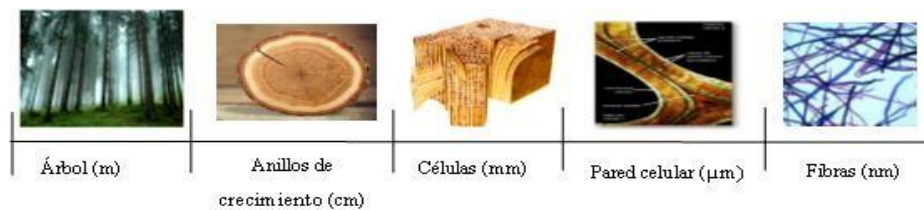


Figura 11. 18. Diagrama de Flujo de la estructura jerárquica de madera.

Los elementos principales de la madera son celulosa (50%), hemicelulosa (35%), lignina (25%) y extractos (ISO, 2014). El material celulósico tiene un componente básico llamado cristal celulósico. La madera tiene un componente básico de cristal. La estructura jerárquica es principalmente responsable de su alto comportamiento elástico anisotrópico. A partir de las diferentes escalas de madera, es posible distinguir dos casos de anisotropía ultrasónica a saber; la anisotropía textural en la escala de las fibras inducidas por la orientación preferencial de los elementos anatómicos (traqueidas, fibras, células de los radios, vasos, etc.) y la anisotropía microestructural relacionada con la organización de la pared celular.

Por otro lado, el comportamiento de la propagación de ondas ultrasónicas en madera proporciona información sobre la estructura interna del material bajo investigación. La velocidad de propagación de la onda ultrasónica está relacionada con las constantes elásticas, la densidad del medio y los parámetros de la estructura interna de la madera, tales como: estructura de los anillos de crecimiento, condiciones de crecimiento, etc. (Rede, 2017; Lahr, 2014).

La técnica de ultrasonido de emisión transmisión tiene una sensibilidad con la cual es posible calcular el umbral de detección de la técnica; usando la velocidad longitudinal y la velocidad transversal. Esto gracias a la obtención del promedio de las velocidades entre la frecuencia del palpador. Y se calcula de la siguiente forma:

$$n = \lambda / 2$$

Ecuación 23. Umbral de detección de la técnica ultrasónica de emisión transmisión.

Así tenemos que para la $V_l = 1810 \text{ m/seg.} = 1810 \text{ m/seg.} / 1 \times 10^6 \text{ 1/seg} = 1.81 \text{ mm}$
 $n = 0.9 \text{ mm}$ Y para la $V_t = 1401 \text{ m/seg.} = 1401 \text{ m/seg.} / 0.5 \times 10^6 \text{ 1/seg} = 2.8 \text{ mm}$ $n = 1.9 \text{ mm}$

Aplicando la técnica de emisión transmisión ultrasónica se calculó el grado de anisotropía debido a la velocidad de cizallamiento de propagación ultrasónica en las muestras de madera deteriorada y madera sana. Además, se llevaron a cabo exámenes microestructurales en la microscopía óptica relacionando las propiedades elásticas de la anisotropía con la microestructura de madera observada (Sonderegger, s.f.).

11.11. Preparación de muestras para microscopio Electrónico de Barrido

Para la obtención de las imágenes anatómicas de los dos grupos de madera del Caso 2 debido a que estas son de origen orgánico no conductora, deben de estar limpias secas y ser conductoras de electricidad. Para lograr que las muestras sean conductoras se recubrieron con una capa de material conductor metálico, que en este caso fue cobre mediante la técnica del Sputtering (pulverización catódica) ver figura 11.19 b. En este caso fue para que en la muestra haya desprendimiento de electrones y sean captados en el SEM. Se colocaron sobre una montura de aleación de Aluminio ver figura 11.19 c. Para pegar la muestra a la montura se utilizaron cintas de carbón y cintas de cobre.

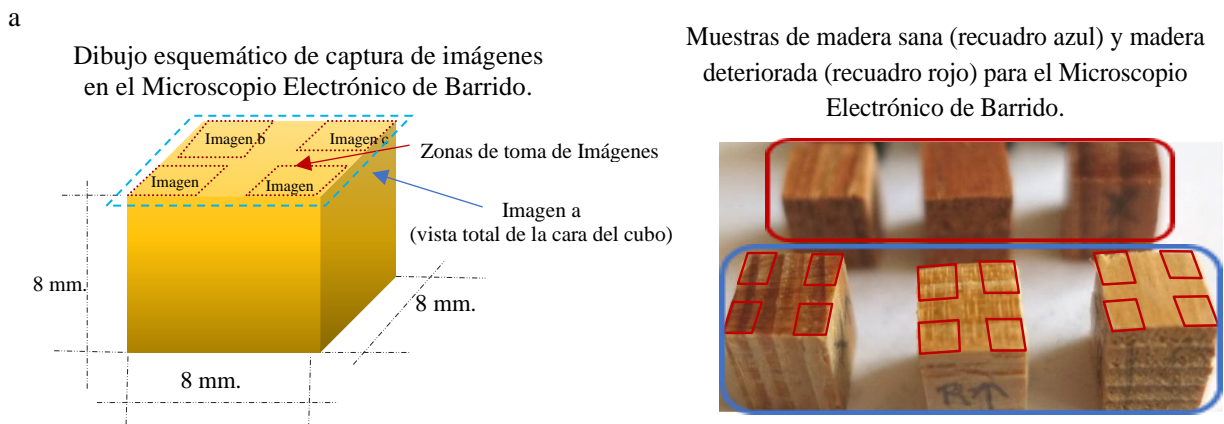


Figura 11. 19. Muestras tratadas (recuadro verde) muestras deterioradas (recuadro rojo) y muestras sanas (recuadro azul), b aparato de pulverización catódica (técnica Sputtering), c montura de aleación de Aluminio y muestras tratadas y d microscopio electrónico de Barrido.

Las muestras para el microscopio electrónico de barrido se cortaron con las dimensiones de 8 mm \times 8 mm \times 8 mm. Las secciones se montaron en discos de carbono aplicados a trozos para escanear con un microscopio electrónico de exploración de emisión de campo JEOL JSPM-5200.

Se tomaron imágenes de las áreas totales de cada una de las caras de las tres muestras (sentido, longitudinal, transversal y radial) de las 6 vigas seleccionadas (madera sana y madera deteriorada), a un aumento de 13 x, a una distancia de trabajo de 48 μ m, (para observar el área total de cada muestra), a 200x, a una distancia de trabajo de 24 μ m y en algunos casos a 400.x a una distancia de trabajo de 24 μ m (para observar detalles de las paredes celulares). Para ambos grupos fue posible distinguir las características anatómicas de las estructuras generales de madera de coníferas. El criterio de muestreo fue tomar una imagen en cada una de las esquinas de las superficies de las distintas direcciones de las 6 vigas seleccionadas cómo se observa en la figura 11.20.

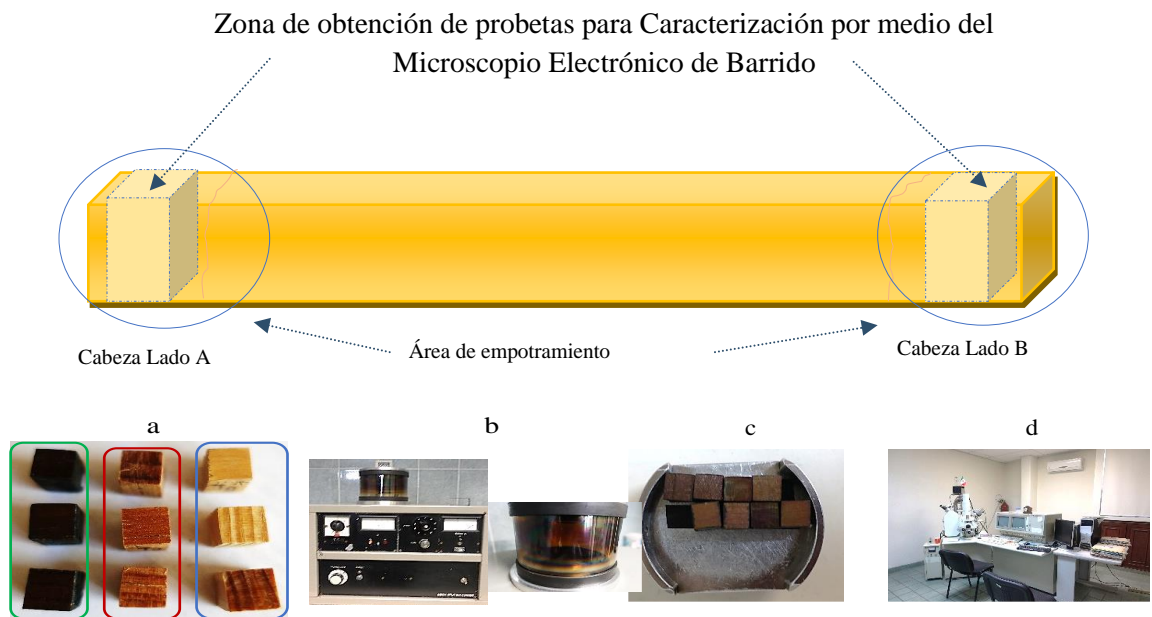


Figura 11. 20. Dibujo esquemático de captura de imágenes en el Microscopio Electrónico de Barrido (a), muestras deterioradas (recuadro rojo) y muestras sanas (recuadro azul).

11.12. Metodología para análisis químico

Se realizó un análisis para determinar los principales componentes químicos de la madera de cuatro de las cinco vigas de madera recuperada durante los trabajos de conservación de la Catedral Metropolitana de Morelia, Michoacán (área de archivo de la Mitra). En este estudio se determinaron los porcentajes de las cenizas, el pH, las sustancias extraíbles, la cantidad de holocelulosa, de lignina y los taninos de las muestras de albura sana (A_S), albura deteriorada (A_D), duramen sano (D_S) y duramen deteriorado (D_D).

11.12.1. Determinación del Contenido de Humedad para las muestras empleadas en el Análisis Químico

El material fue preparado según la norma T 257 (TAPPI, 2000) en la cual se describe que la madera debe molerse a un tamaño de partícula fino (ver figura 11.21 a), pasando por una malla de 0.4 mm (malla 40) como se observa en la figura 11.21 b.

Debido a que los extraíbles de la madera son solubles en solventes neutros y no se consideran para las pruebas a efectuar en este estudio, estos materiales deben de ser eliminados para poder comenzar el análisis químico, por esa razón se utilizó la norma T 264 cm-97 (TAPPI, 2000), empleando una estufa convencional, marca NOVATECH, modelo HS45-50 (ver figura 11.21 c). Las determinaciones se hicieron por duplicado tomando como testigo otra área de la viga 2 la cual no estuvo empotrada en el muro.

$$\%H = \frac{Ph - Pa}{Ph} (100)$$

Ecuación 24. Obtención del % de humedad.

Donde;

Ph = peso húmedo o inicial en gramos

Pa = peso anhidro en gramos

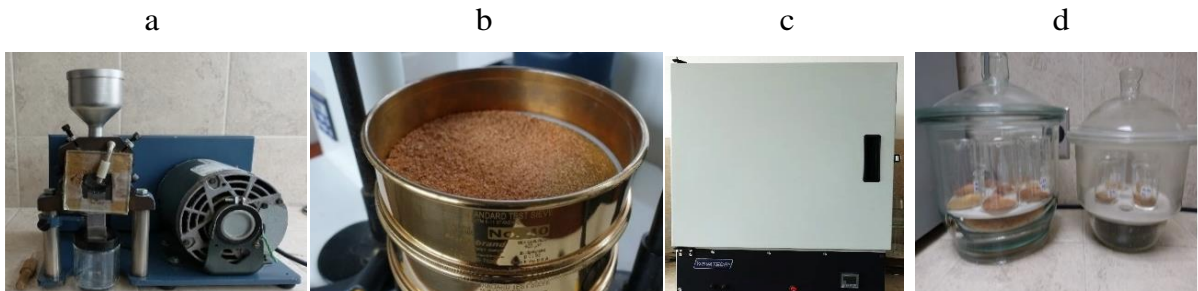


Figura 11. 21. Obtención del contenido de humedad para análisis químico Molino Willey (a), tamizado de las muestras (b), estufa (c) y muestras estabilizadas (d).

11.12.2. Determinación del contenido de cenizas

El contenido de las sustancias inorgánicas (cenizas) se calculó gravimétricamente, después de quemar cuidadosamente 2 g de harina de madera libre de humedad sin extraer en un crisol de níquel (ver figura 11.22 a), previamente tarado, sobre una placa de calentamiento hasta el cese de desprendimiento de humo (ver figura 11.22 b), para su posterior calcinación en una mufla LINDBERG, modelo 51894, a una temperatura de 525 °C como lo indica la norma T 211 om-93 (TAPPI, 2000), (ver figura 11.22 c), el proceso se dio por concluido hasta que el crisol tuvo peso constante, el procedimiento y cálculo de las sustancias inorgánicas o cenizas se realizó de acuerdo con la norma T 211 om-93 (TAPPI, 2000a), (ver figura 11.22 d), tomando como testigo otra área de la viga 2 la cual no estuvo empotrada en el muro, ver figura 11.13.

$$\text{Cenizas \%} = \frac{Pc}{Pa} (100)$$

Ecuación 25. Obtención de % de cenizas.

Donde;

Pc = peso de cenizas en gramos

Pa = peso anhidro en gramos

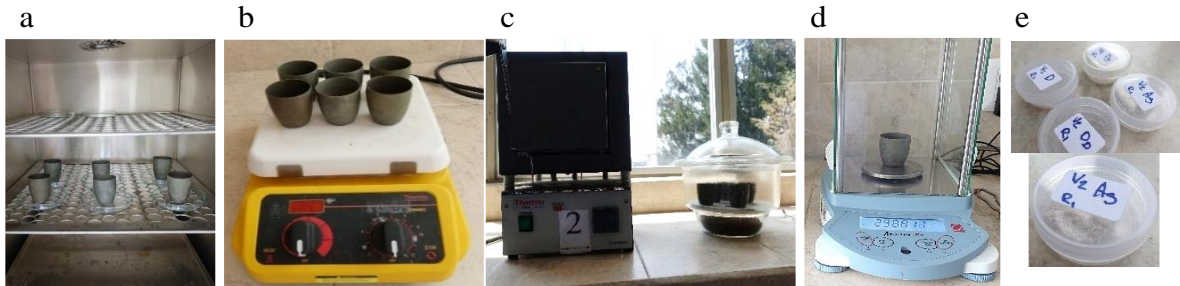


Figura 11. 22. Etapas del proceso de obtención de cenizas, crisol de níquel en tratamiento (a), placa de calentamiento con las muestras (b), mufla para proceso de calcinación (c) pesado de cenizas posterior al enfriamiento(d) y cenizas (e).

11.12.3. Medición del pH para las muestras empleadas en el análisis químico del

Caso 2

La medición del pH se realizó tomando la lectura inmediatamente al comenzar la prueba, a los 5 minutos, a las 4 horas, a las 24 horas y finalmente a las 48 horas respectivamente en la harina de madera, 2 g de harina de madera sin extraer se colocaron en un vaso de precipitados con 20 ml de agua destilada, se registró la lectura inicial del pH, (TAPPI, 2000), midiéndose con un potenciómetro marca Conductronic pH 120. Se realizó de acuerdo al método de Sandermann y Rothkamm (1959), ver figura 11.23.

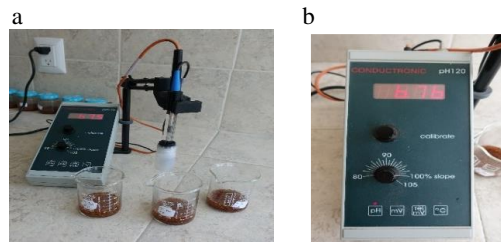


Figura 11. 23. Medición de pH con potenciómetro para el análisis químico en duramen sano y duramen deteriorado (a) y duramen deteriorado, potenciómetro marca Conductronic pH 120 (b).

11.12.4. Solubilidad en sosa para las muestras empleadas en el análisis químico

Solubilidad en sosa. En un matraz se colocaron 2 g de harina de madera y 100 ml de NaOH al 1.0%; se llevaron a digestión en baño de agua durante 60 minutos. Se agitó la harina con una

varilla de vidrio durante aproximadamente 5 segundos, a los 10 min, a los 15 min y a los 25 min después de la colocación en el baño, ver figura 11.24.



Figura 11. 24. Matraz con 2 g de harina de madera (a), matraz con harina de madera y 100 ml de NaOH al 1.0% (b), muestras en baño de agua durante 60 minutos (c).

Al final de la digestión, el material se filtró y lavó con 100 ml de agua caliente, posteriormente se neutralizó en dos etapas con 25 ml de ácido acético al 10% y se lavó nuevamente con agua caliente hasta dejar el material libre de ácido.

Finalmente, se secó el filtro y su contenido a 105 °C hasta obtener peso constante, ver figura 11.25. El proceso y el cálculo de la solubilidad en sosa se efectuó siguiendo la norma T 212 om-98 (TAPPI, 2000b).

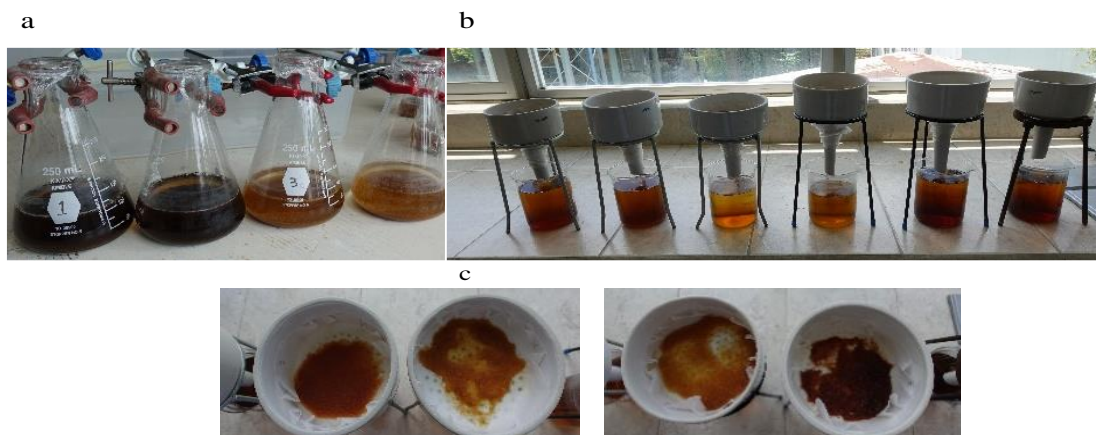


Figura 11. 25. Muestras después del tratamiento en baño de agua (a), material filtrado y lavado con 100 ml de agua caliente, neutralizado en dos etapas con 25 ml de ácido acético al 10% (b) y muestras del material libre de ácido para albura y duramen sano y deteriorado (c).

11.12.5. Obtención de extraíbles para las muestras empleadas en el análisis químico

Obtención de extraíbles, las sustancias extraíbles se determinaron por medio del uso de solventes de forma secuencial y de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente, como se observa en la figura 11.26.

Realizando el ciclo de extracción en un equipo Soxhlet por un tiempo de 4 horas, se tomó la lectura de la hora y el número de los reflujos obtenidos. Obteniendo “madera libre de extraíbles”. El solvente se eliminó usando un evaporador rotatorio y los extractos se secaron a 60 ° C, los matraces de balón o fondo plano que se emplean deben de pasar a un desecador para obtener su peso constante (ver figura 11.27). El contenido extractivo se calculó de acuerdo con la Ecuación 26:

$$\%CE = \frac{m_e}{m_{od}} (100)$$

Ecuación 26. Obtención del % de extraíbles.

Donde;

C E Contenido de extracción (%)

m_e peso de extractos (g)

m_{od} peso seco de la muestra mod. (g)

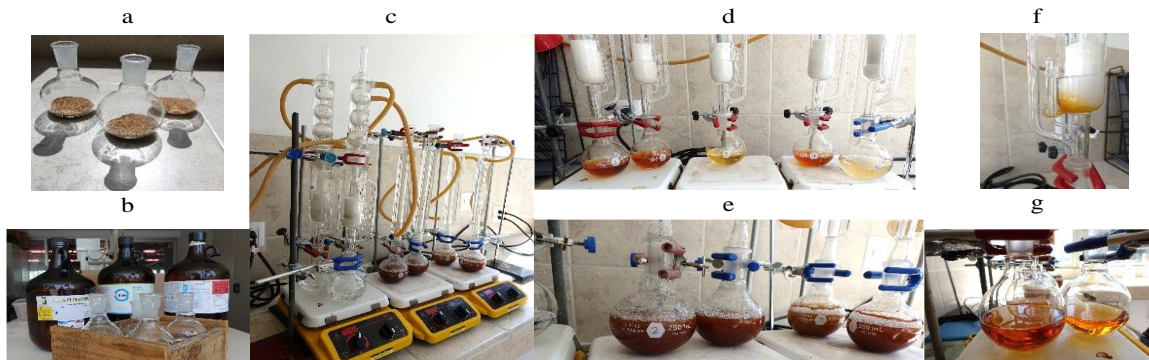


Figura 11. 26. Muestras para extracción en Equipo Solxhlet (a), solventes de forma secuencial y de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente (b), Equipo Solxhlet para la determinación del contenido de extraíbles (c), Equipo Solxlet para la determinación con solventes ciclohexano, acetona y metanol (d), Equipo Solxhlet para la determinación agua caliente (e), cartuchos. (f) y (g).

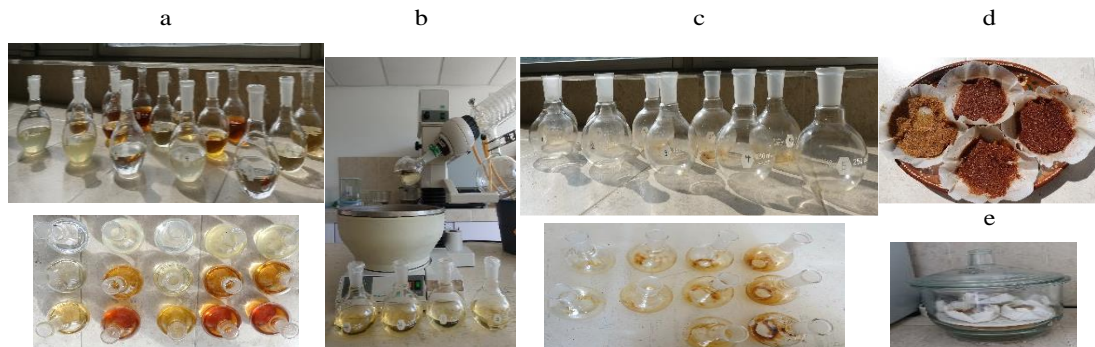


Figura 11. 27. Extractos obtenidos con Equipo Solxhlet para la determinación con solventes ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente (a), equipo de rotavapor para obtención de extraíbles (b), Evaporación del solvente resultante (c), Material filtrado (d) y obtención de harina libre de extraíbles (e).

11.12.6. Determinación de holocelulosa para las muestras empleadas en el análisis químico

Determinación de holocelulosa, para su obtención se empleó el método de (Wise, 1946). Se utilizó harina libre de extraíbles. Las muestras se colocaron en matraces Erlenmeyer, en donde se les adicionó 0.3 gr. de clorito de sodio en 32 ml de agua, así como 10 gotas de ácido acético. Los matraces deben estar tapados a baño María a una temperatura de 75 °C por una hora, transcurrida la hora, se agregan 2 gotas de ácido acético y 0.3 gr de clorito de sodio, agitando con cuidado para luego dejar a reposar, este procedimiento se debe repetir 4 veces en un tiempo de 4 horas en total. Luego, las muestras se enfrían y se colocan en filtros de vidrio para poder aplicar vacío para que el material se separe y pueda ser lavado con agua destilada fría y 20 ml de acetona hasta tener un pH neutro; para terminar, los filtros se pasan a la estufa en la cual se secan a una temperatura de 40 °C, (ver figura 11.28 y 11.29).

$$\%CHO = \frac{m_h}{m_{od}} (100)$$

Ecuación 27. Obtención del % de Holocelulosa.

CHO Contenido de holocelulosa (%)

m_h peso seco en horno de holocelulosa (g)

m_{od} peso seco en horno de la muestra antes de la extracción (g)

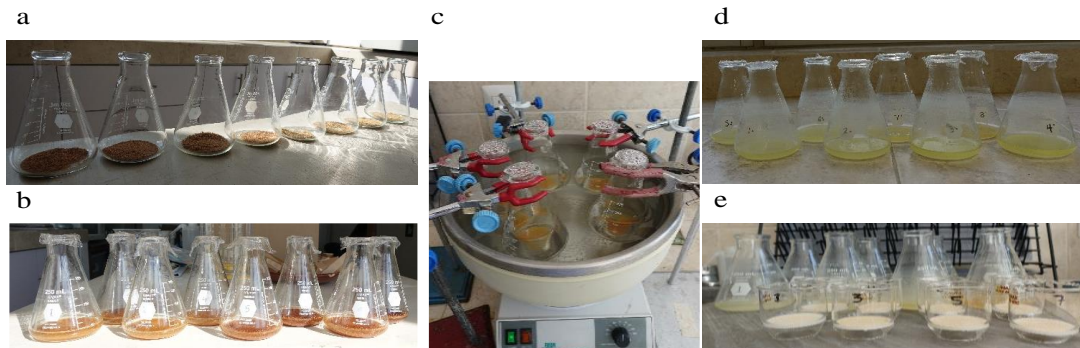


Figura 11.46. Muestras de harina libres de extraíbles (a), muestras en una solución de ácido acético y clorito de sodio (b), muestras a Baño María (c), muestras posteriormente al tratamiento (d), muestras y filtros (e).



Figura 11.47. Filtros de vidrio para aplicar vacío (a), filtros en estufa de secado (b) y obtención de Holocelulosa (c).

11.12.7. Determinación del contenido de lignina para las muestras empleadas en el análisis químico

En esta prueba se optó seguir el método de TAPPI T 222 om-98 (2000), para obtener lignina “Klason”; se empleó, la harina libre de extraíbles a la cual se agregó ácido sulfúrico al 72%, se agitó con cuidado, posteriormente se dejó reposar por dos horas, pasado ese tiempo, se adicionó 300 ml de agua destilada y pasó a hervirse por 4 horas, a continuación, la muestra se filtró y lavó con agua destilada hirviendo hasta obtener un pH neutro, finalmente se llevaron a la estufa para conseguir el peso constante, (ver figura 11.30).

$$\%CL = \frac{m_l}{m_{od}} (100)$$

Ecuación 28. Obtención del % de Lignina.

Donde;

CL Contenido de lignina LC (%)

M_l peso seco en horno de lignina (g)

M_{od} peso seco en horno de la muestra antes de la extracción (g)

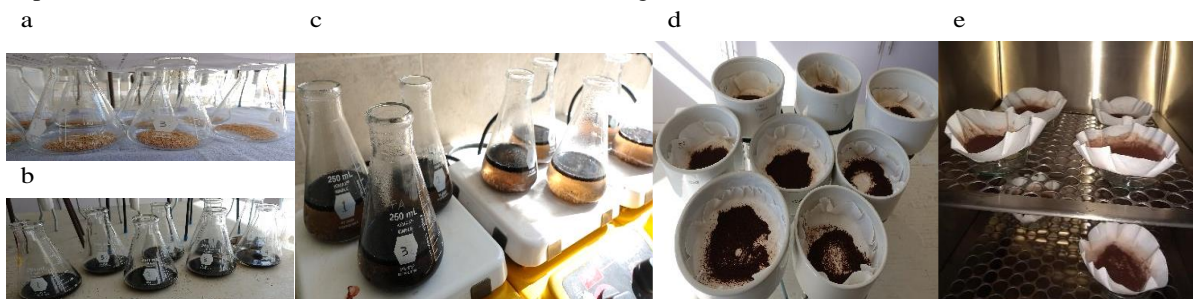


Figura 11. 28. Harina libre de extraíbles (a), harina libre de extraíbles en ácido sulfúrico (b), Soluciones de las muestras sometidas a ebullición (c), muestras en filtro para lavado (d), muestras a la estufa para peso constante lignina (e).

11.13. Diseño Experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición L_L y T_R , para el Caso 2

Los dos grupos de cinco vigas sanas (madera de resiente corta) y de cinco vigas deterioradas (Madera de recuperación) se consideraron dos muestras independientes. Las variables de respuesta de cada muestra fueron el contenido de humedad (CH), la densidad, (ρ_H) y la velocidad de onda (v) en las direcciones transversal-radial (T_R) y longitudinal (L).

El módulo dinámico (E) y la rigidez de las vigas (EI) se consideraron variables derivadas. Se realizaron pruebas de normalidad, así como de verificación y análisis de varianza.

El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95% fueron valores de $P (\alpha = 0.05) < 0.05$ (ver Tabla 11.6).

Tabla 11.6. Diseño Experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición L_L y T_R , para el Caso 2.

<ul style="list-style-type: none"> • Con el fin de determinar si hay diferencias entre las vigas sanas y deterioradas con O. E. <p>H_0: efecto del número de viga = 0</p> <p>H_1: efecto del número de viga $\neq 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el efecto del material sano o deteriorado <p>H_0: efecto del tipo de material = 0</p> <p>H_1: efecto del tipo de material $\neq 0$</p>
--	--

11.14. Diseño experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas Ultrasonica en los sentidos de medición L_L , R_R y T_T

Los dos grupos de tres vigas sanas (madera de resiente corta) y tres vigas deterioradas (madera de recuperación) se consideraron dos muestras independientes. Las variables de respuesta de cada muestra fueron la velocidad longitudinal (V_L), el módulo de Young (M_Y) y la atenuación (A) en las direcciones longitudinal (L_L), transversal (T_T) y radial (R_R).

El módulo de Young (M_Y) y la atenuación (A) se consideraron variables derivadas. Se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) y Tukey. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95% fueron valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$ (ver Tabla 11.7).

Tabla 11.7. Diseño experimental para la Velocidad Longitudinal con Ondas Ultrasonica en los sentidos de medición L_L , R_R y T_T .

<ul style="list-style-type: none"> • Con el fin de determinar si hay diferencias entre las vigas sanas y deterioradas con U. <p>H_0: efecto del número de viga = 0</p> <p>H_1: efecto del número de viga $\neq 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el efecto del material sano o deteriorado. <p>H_0: efecto del tipo de material = 0</p> <p>H_1: efecto del tipo de material $\neq 0$</p>
---	---

11.15. Diseño experimental para la Velocidad Transversal con Ondas Ultrasonica en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , para el Caso 2

Los dos grupos de tres vigas sanas (madera de resiente corta) y tres vigas deterioradas (madera de recuperación) se consideraron como dos muestras independientes, al igual que en las mediciones anteriormente realizadas con la velocidad Longitudinal. Las variables de respuesta de cada muestra fueron la velocidad Transversal (V_T), el Módulo de Corte (M_C) y la atenuación (A) en las direcciones longitudinal radial (L_R), longitudinal transversal (L_T), transversal

longitudinal (T_L), transversal radial (T_R) y radial longitudinal (R_L) y radial transversal (R_T). El Módulo de Corte (M^C) y la Atenuación (A) se consideraron variables derivadas.

Se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95% fueron valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$ (ver Tabla 11.8).

Tabla 11.8. Diseño experimental para la Velocidad Transversal con Ondas Ultrasónica en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , para el Caso2.

<ul style="list-style-type: none"> • Con el fin de determinar si hay diferencias entre las vigas <p>H_0: efecto del número de viga = 0</p> <p>H_1: efecto del número de viga \neq 0</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el efecto del material <p>H_0: efecto del tipo de material = 0</p> <p>H_1: efecto del tipo de material \neq 0</p>
---	---

11.16. Diseño Experimental para el Análisis Químico de las vigas 1, 2, 4 y 5 de Madera de Recuperación.

Las vigas 1, 2, 4 y 5 deterioradas (madera de recuperación) y la viga 2 en su zona sana (madera de recuperación) se consideraron como muestras independientes. Las variables de respuesta de cada muestra fueron el % de cenizas, el % de pH, el % de Extraíbles solubles en sosa, % Extraíbles solubles en ciclohexano, acetona, metanol y agua, % Celulosa Wise y % de lignina; en las zonas de albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd). Se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) y Tukey. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95% fueron valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$, partiendo de las hipótesis planteadas a continuación (ver Tabla 11.9):.

Tabla 11.9. Diseño Experimental para el Análisis Químico de las vigas 1, 2, 4 y 5 de Madera de Recuperación.

<ul style="list-style-type: none"> • Con el fin de determinar si hay diferencias entre las vigas <p>H_0: efecto del número de viga = 0</p> <p>H_1: efecto del número de viga \neq 0</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el efecto del material <p>H_0: efecto del tipo de material = 0</p> <p>H_1: efecto del tipo de material \neq 0</p>
---	---

11.17. Resultados de las mediciones del Contenido de Humedad para los dos grupos de madera en el Caso 2 *in situ*

En las siguientes graficas se observa la Comparación del Contenido de Humedad para cada una de las vigas madera de reciente corta y las vigas de madera de recuperación, así como el promedio de su Contenido de Humedad *in situ* (ver figura 11.31).

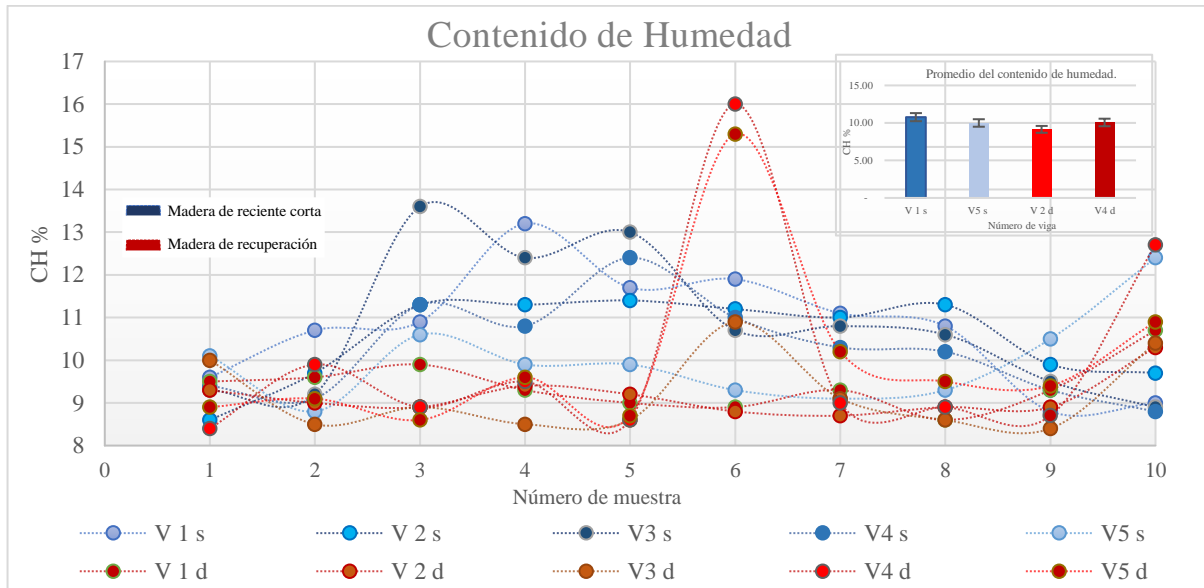


Figura 11. 29. Comparación del Contenido de Humedad para las vigas de madera de reciente corta y las vigas de madera de recuperación *in situ*.

De acuerdo con Unterwieser y Schickhofer (2010), el impacto de la variación del contenido de humedad sobre la densidad de las vigas nuevas sería un factor de disminución de 0.67% y sobre la velocidad de onda un factor de aumento de 0.96%. De tal forma, una vez que las vigas recién instaladas se estabilicen, la disminución de su densidad y el aumento de la velocidad de onda resultarán en el incremento del módulo dinámico, lo que minimiza el riesgo de la sustitución de las vigas.

En síntesis, la madera de las vigas sanas está en estado seco y su Contenido de Humedad es equivalente al de las vigas de madera de recuperación. Este corolario satisface la recomendación de instalar elementos estructurales de madera seca en trabajos de restauración (Riggio *et al.*, 2018).

Los resultados del análisis estadístico indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los contenidos de humedad de las vigas nuevas y viejas. Aritméticamente, el contenido de humedad de las vigas nuevas fue de 1.6% mayor que el de las vigas viejas. Los coeficientes de variación de los dos grupos de vigas fueron similares (ver anexo).

11.18. Resultados de la Densidad para ambos grupos de madera *in situ*

Los resultados del análisis estadístico indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades de la madera de las vigas de madera sanas y las vigas de madera de recuperación. La densidad de las vigas sanas es 18.1% mayor que la densidad de las vigas de recuperación. Aun considerando la disminución de la densidad ocasionada por el nuevo contenido de humedad en equilibrio de las vigas ya instaladas, la densidad de las vigas nuevas asegura una magnitud equivalente a las de las antiguas (ver figura 11.32).

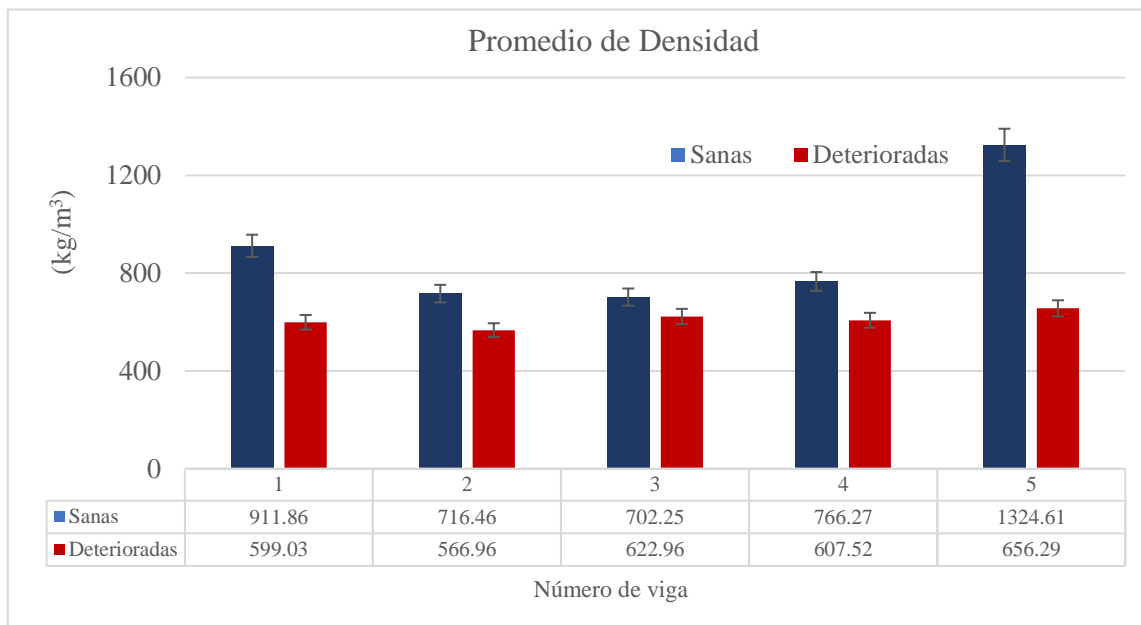


Figura 11. 30. Gráfica de la comparación del promedio de la Densidad para los dos grupos de vigas sanas y deterioradas.

Es importante mencionar que las mediciones de la densidad en las vigas sanas y las vigas de recuperación se realizaron con pequeñas probetas extraídas de los segmentos centrales de las vigas que no contenían deterioro visible. De acuerdo con la hipótesis de la homogeneidad material en la escala macroscópica de la madera, es decir, con densidad repartida uniformemente en todo el volumen de una pieza en estudio, las diferencias entre vigas y entre grupos de vigas nuevas y viejas se refiere al valor promedio de las mediciones sin considerar las variaciones en la estructura anatómica de la madera. En consecuencia, la densidad de la madera de las vigas nuevas, al ser mayor que la de las vigas viejas, satisface el requerimiento de densidad equivalente en la reinstalación de vigas de madera vieja en edificaciones antiguas propuesto por Cavalli *et al.* (2016b).

Posiblemente el grupo de vigas sanas está formado por diferentes especies, conjetura que va en contra del principio de sustitución de material recomendado por el International Council on Monuments and Sites. Esta particularidad deriva en la necesidad de identificar la especie de la madera nueva y tratar de que sea, al menos, del mismo género que el de la madera vieja. Si no se puede asegurar la sustitución con madera de la misma especie, la densidad y la rigidez de las vigas son los criterios que pueden asegurar una sustitución con características de resistencia equivalentes.

11.19. Resultados de las mediciones con Ondas de Esfuerzo y Ondas ultrasónicas (Onda Longitudinal y Onda Transversal) para los dos grupos de madera en el Caso 2

Los dos grupos de madera sana y madera de recuperación deteriorada para el caso 2 fueron analizadas utilizando Ondas de esfuerzo (*in situ*) y con Ondas Ultrasónicas de tipo Longitudinal y Transversal (laboratorio). Obteniendo de esta manera el tiempo y la velocidad de onda, las cuales fueron analizadas en las direcciones V_{LL} , V_{LR} , V_{LT} , V_{RR} , V_{RL} , V_{RT} , V_{TT} , V_{TL} y V_{TR} donde el primer subíndice indica la dirección de propagación de la onda ultrasónica y el segundo subíndice denota su polarización.

En los análisis elaborados con el método no destructivo de ultrasonido de Emisión transmisión se confirmó lo que es mencionado por McGovern (2011) en donde se observó que las velocidades aumentan con el aumento de la frecuencia y la disminución a medida que aumenta la cantidad de desintegración, mientras que las atenuaciones correspondientes aumentan con el aumento de la frecuencia y con la cantidad de desintegración. Lo anterior se observa perfectamente en las gráficas de velocidad longitudinal y de atenuación para ambos grupos de madera.

En el apartado de análisis estadístico se presentan los resultados de todo el análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para las distintas condiciones de los diferentes estudios aplicados a los grupos de madera en los 9 sentidos de medición de la madera con la técnica de Emisión Trasmisión utilizando Ondas el Esfuerzo en los análisis en campo, Ondas de Ultrasonido para las mediciones efectuadas en laboratorio a los grupos de madera sana y deteriorada, así como también los resultados estadísticos de la caracterización química básica de albura y duramen de material deteriorado del Caso 2.

11.19.1. Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R

Las siguientes graficas presenta los resultados de las mediciones con Ondas de Esfuerzo (Velocidad Longitudinal y el módulo de Young) en las direcciones longitudinal (L_L) y transversal radial (T_R), de las mediciones realizadas en cada una de las diez vigas seleccionadas de ambos grupos de vigas sanas y vigas deterioradas, así como también los promedios obtenidos para cada una en sus distintos análisis (ver figuras 11.33 y 11.34).

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido L_L muestra que la viga 4 sana, la viga 1,3 y 5 deterioradas existe una diferencia significativa con todas las otras vigas; en tanto que la viga 1 sana presenta diferencias significativas con todas las otras exceptuando a la viga 2 deteriorada. La viga 2 sana presenta diferencias significativas con todas las otras exceptuando a la viga 5 sana. En el sentido L_L casi todas las vigas presentaron una diferencia estadísticamente significativa entre ellas (ver anexo).

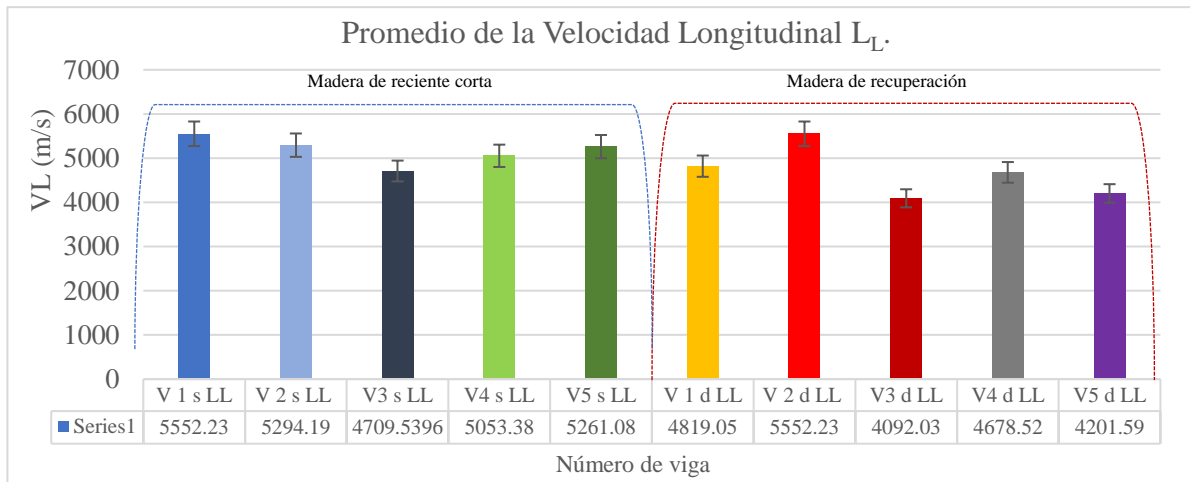


Figura 11. 31. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido T_R muestra que entre los dos grupos de vigas la viga 5 sana es la que presenta mayor diferencia significativa exceptuando a las vigas 3 y 4 sanas. La viga 5 deteriorada presenta diferencias significativas con las vigas 1, 2 y 4 sanas y con las vigas 1 y 4 deterioradas. En la velocidad longitudinal en el sentido T_R no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las vigas (ver anexo).

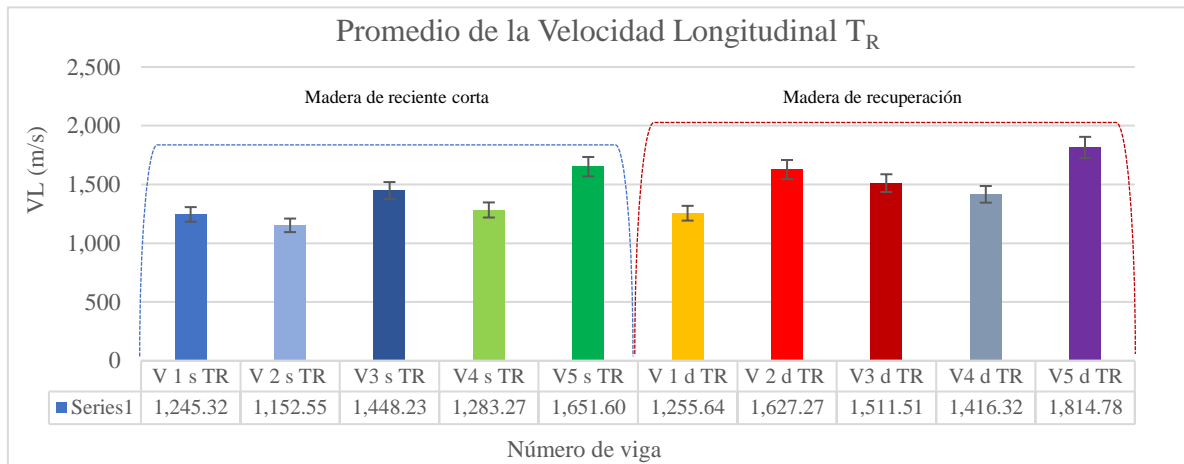


Figura 11. 32. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido T_R .

11.19.1.1. Velocidad Longitudinal con Ondas de Esfuerzo para los dos grupos de muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R .

Las siguientes graficas presenta los valores de las mediciones de la Velocidad y del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal empleando Ondas de Esfuerzo entre los dos grupos de madera para cada una de las variables, para los sentidos de medición L_L y T_R ; así como los valores medios, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación de las mediciones realizadas en las vigas sanas y vigas deterioradas. (ver figura 11.35).

Las mediciones con ondas de esfuerzo entre los dos grupos de vigas y las dos direcciones de medición (L_L y T_R), mestran que la viga con los valores mas altos es la 2 deteriorada en la dirección L_L y la mas baja fue la viga 4 deteriorada en la dirección T_R .

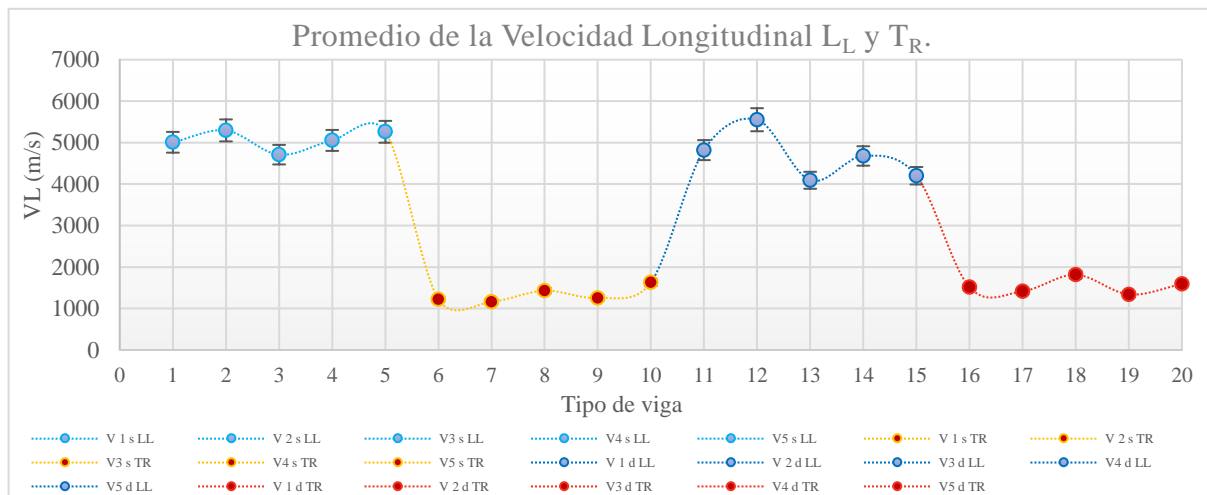


Figura 11. 33. Gráfica del promedios de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en los sentidos L_L y T_R .

La Correlación de la medición de la Velocidad Longitudinal utilizando Ondas de Esfuerzo, las vigas 3 y 5 en el sentido L_L son las que presentaron diferencias significativas entre todas las otras vigas menos entre ellas dos. En el sentido L_L muestra que entre la viga 1 sana en el sentido L_L existe una diferencia estadísticamente significativa entre la gran mayoría de las vigas exceptuando las vigas 2,3,4, y 5 sanas en el sentido L_L , (ver anexo).

11.19.2. Módulo de Young de la Velocidad Longitudinal (Ondas de Esfuerzo) para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R .

Las siguientes graficas presenta los valores de las mediciones del Módulo de Young en los sentidos de medición L_L y T_R con la Velocidad Longitudinal utilizando Ondas de Esfuerzo entre los dos grupos de madera para cada una de las variables, así como los valores medios, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación de las mediciones realizadas en las vigas sanas y vigas deterioradas (ver figuras 11.36 y 11.37).

La Correlación de la medición del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal en el sentido L_L muestra que entre todas las vigas si existe una diferencia estadísticamente significativa solo entre la viga 3 deteriorada y la viga 5 deteriorada no existe diferencia significativa. En el análisis de datos en el Módulo de Young se observa que si existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos y entre grupo (ver anexo).

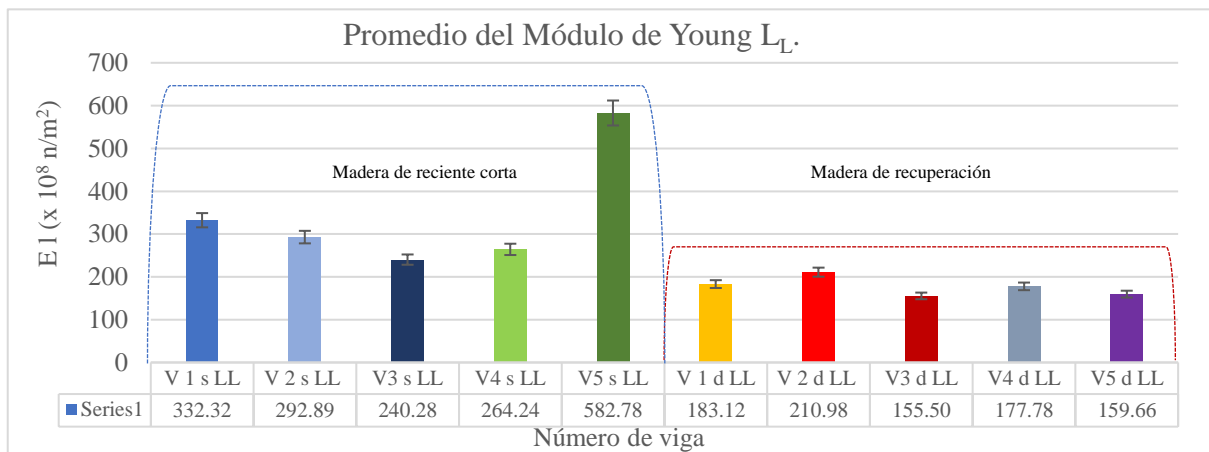


Figura 11. 34. Gráfica del promedio de mediciones del Módulo de Young con de la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La Correlación del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal en el sentido T_R muestra que entre la viga 5 deteriorada existen diferencias significativas con las otras vigas. La viga 3 deteriorada solo presento diferencias significativas con las 2, 4 y 5 sanas y con la viga 4 deteriorada. Todas las otras vigas no presentaron diferencias significativas entre ellas.

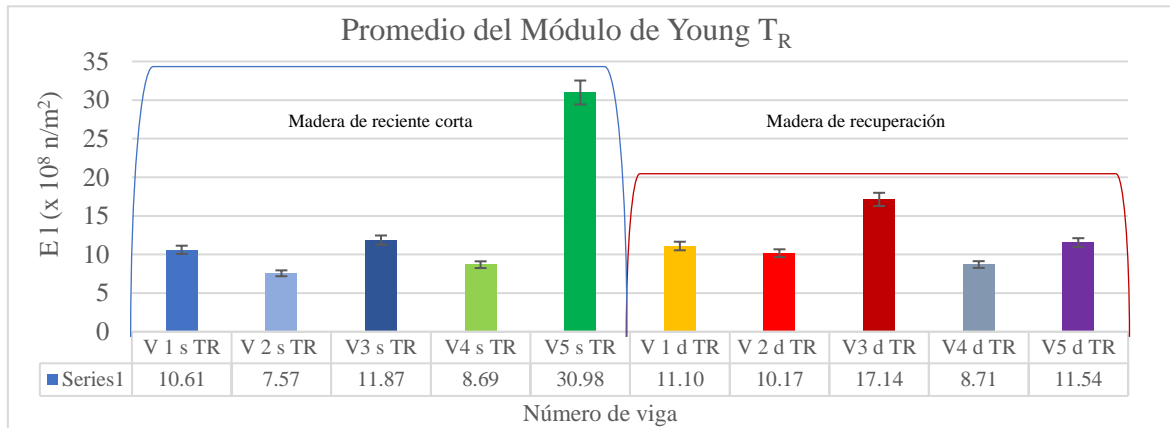


Figura 11. 35. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ondas de esfuerzo en el sentido T_R de medición.

11.19.2.1. Módulo de Young con Ondas de Esfuerzo para los dos grupos de muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L y T_R

En el caso de la medición del Módulo de Young en ambos grupos de vigas en los sentidos de medición L_L y T_R se observó que los valores mayores los presentó la viga 5 sana en el sentido L_L y los valores más bajos los obtuvo la viga 2 sana en el sentido T_R (ver figura 11.38).

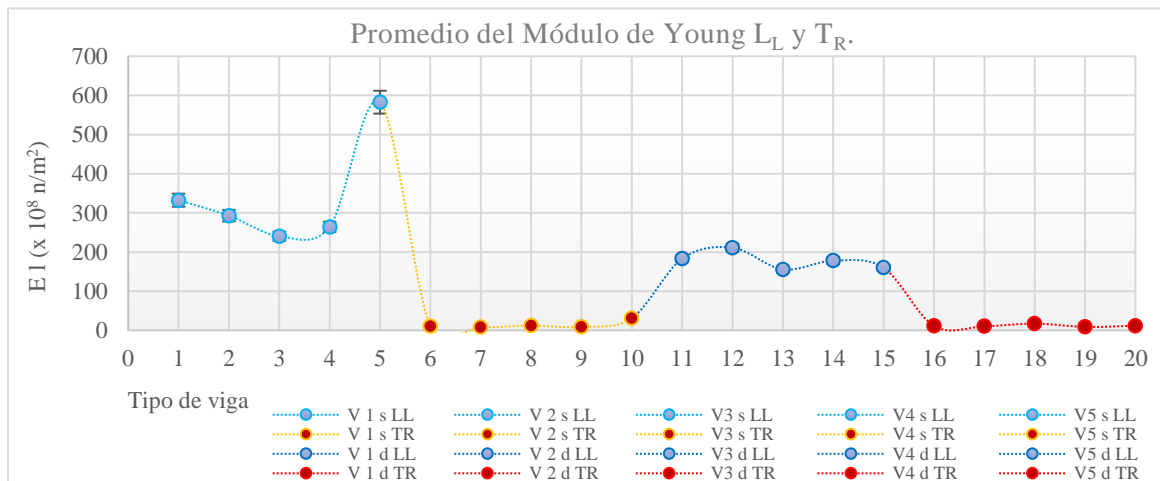


Figura 11. 36. Gráfica del promedio de la v del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L y T_R .

La Correlación de la medición del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal utilizando Ondas de Esfuerzo, las vigas 3 y 5 en el sentido L_L son las que presentaron diferencias significativas entre todas las otras vigas menos entre ellas dos. En el sentido L_L muestra que entre la viga 1 sana en el sentido L_L existe una diferencia estadísticamente significativa entre la gran mayoría de las vigas exceptuando las vigas 2,3,4, y 5 sanas.

El Módulo de Young presenta valores semejantes a los que la velocidad longitudinal presenta siendo los rangos mayores los que se observaron en el sentido longitudinal de medición. Tanto la Velocidad Longitudinal como el Módulo de Young en sus mediciones más altas (sentido L_L) son mayores en un 90% en relación con los valores obtenidos en la dirección transversal radial. La Atenuación es un parámetro que no es posible calcular con esta técnica (ver anexo).

11.19.3. Resultados y análisis para las mediciones efectuadas con la Velocidad Longitudinal, por medio de Ultrasonido (laboratorio) para las muestras de Madera Sana y Deteriorada empleando Ultrasonido en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R

Los resultados de las mediciones de la Velocidad Longitudinal, el Módulo de Young y la Atenuación en las direcciones longitudinal (L_L), transversal (T_T) y radial (R_R) de las mediciones realizadas en cada una de las seis vigas seleccionadas de ambos grupos de vigas Sanas y vigas Deterioradas se presenta en las gráficas de las figuras 11.39, 11.40 y 11.41.

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido L_L muestra que entre la viga 1 deteriorada y las vigas 2 y 3 sanas no existen diferencias significativas, así como entre la viga 2 deteriorada y las vigas 2 sana y la 1 deteriorada y finalmente entre la viga 3 deteriorada y las vigas 2 y 3 sanas y las vigas 1 y 2 deterioradas tampoco existe una diferencia significativa. La viga 1 sana es estadísticamente diferente a todas las otras vigas. (ver anexo).

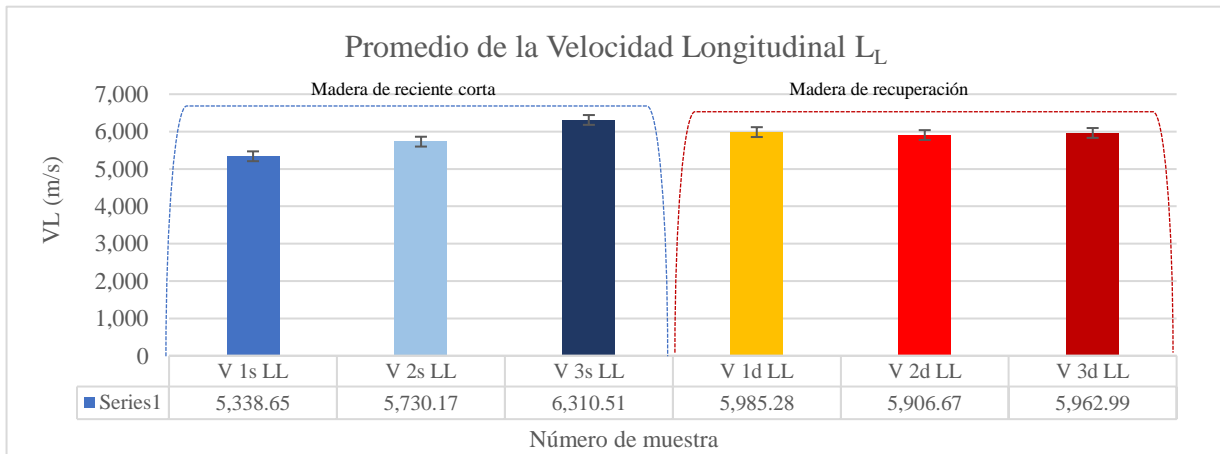


Figura 11. 37. Promedio de la velocidad longitudinal de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido T_R muestra que entre los dos grupos de vigas la viga 5 sana es la que presentó mayor diferencia significativa exceptuando a las vigas 3 y 4 sanas. La viga 5 deteriorada presentó diferencias significativas con las vigas 1, 2 y 4 sanas y con las vigas 1 y 4 deterioradas.

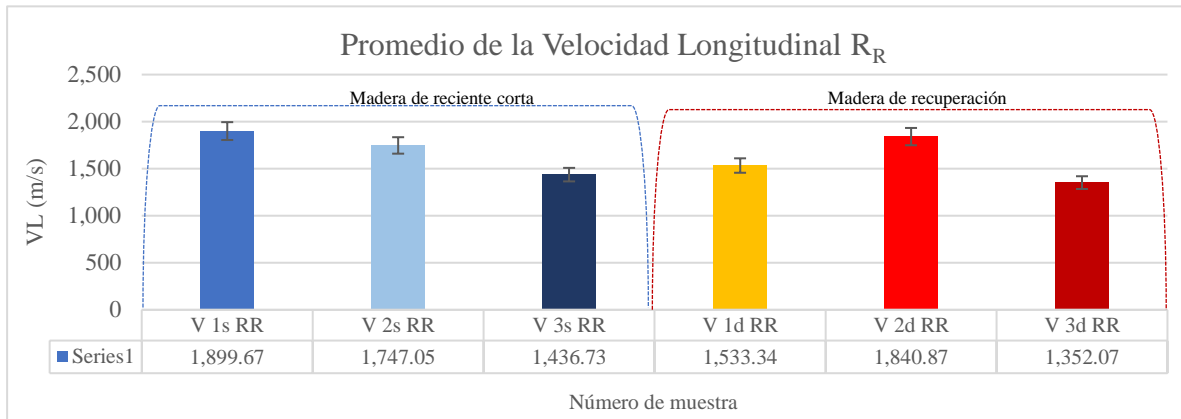


Figura 11. 38. Promedios de la velocidad longitudinal de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido R_R muestra que entre los dos grupos de vigas sanas y deterioradas existe una diferencia significativa únicamente entre la viga 1 sana y las vigas 3 sana y las vigas 1 y 2 deterioradas, entre la viga 3 deteriorada existe diferencia significativa en relación con la viga 3 sana y las vigas 1 y 2 deterioradas, en tanto que la viga 2 sana no presentó ninguna diferencia estadísticamente significativa entre ninguna viga. Observando que en el sentido longitudinal las mediciones fueron para ambos grupos muy semejantes (ver anexo).

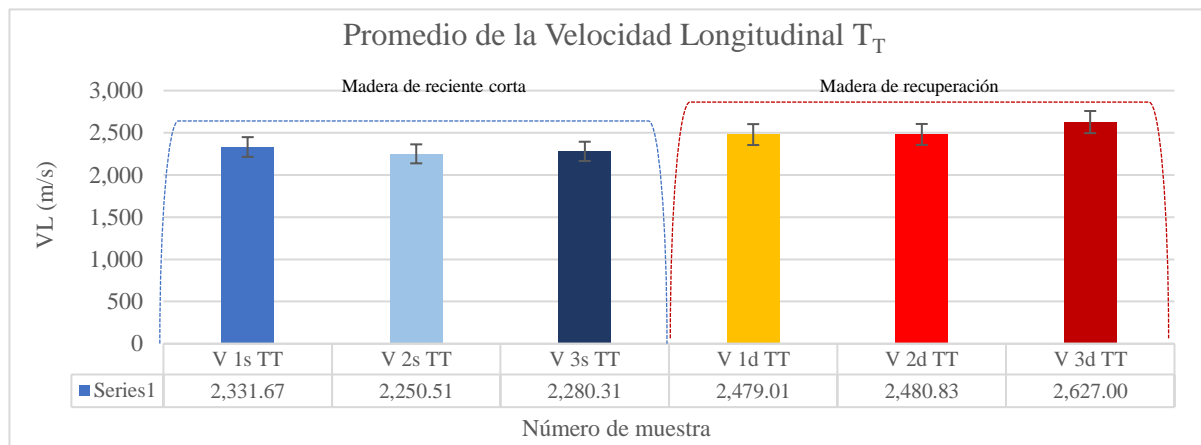


Figura 11. 39. Gráfica del promedios de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .

11.19.3.1. Velocidad Longitudinal de Ultrasonido para las muestras de los dos grupos de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R

En la figura 11.42 se presentan los valores promedio de los dos grupos. La velocidad longitudinal en el sentido longitudinal (L_L) de medición de la madera en todos los casos es el más alto y el de

menor valor es en el sentido radial (R_R) para los dos grupos. La viga que presento los valores más altos fue la viga 3 de madera sana y la viga con valores más bajos fue la viga 2 de la madera sana.

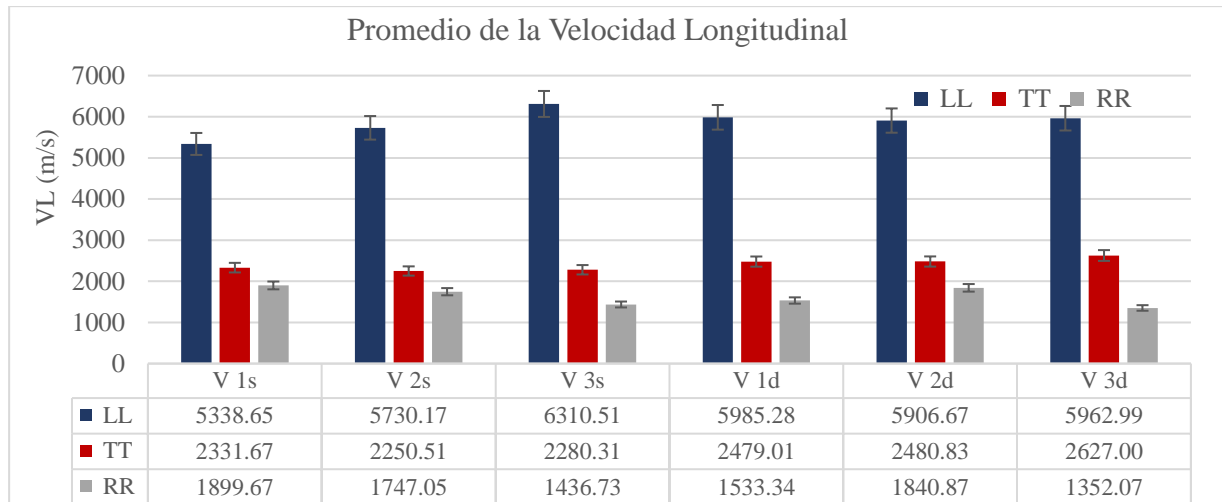


Figura 11. 40. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en los sentidos L_L , T_T y R_R muestra que entre la viga 1, 2 y 3 deterioradas en el sentido de medición L_L no existe diferencias significativas con la viga 2 sana en el sentido de medición L_L , entre la viga 1, 2 y 3 deterioradas. En las vigas 2 y 3 deterioradas en el sentido de medición L_L no existe diferencias significativas con la viga 1 deterioradas en el sentido de medición L_L , así como tampoco entre la viga 3 deteriorada en el sentido L_L y la viga 2 deteriorada en el sentido L_L .

En el sentido de medición T_T no existe diferencias significativas con la viga 1 sana en el sentido de medición L_L . El sentido de medición T_T no existe diferencias significativas entre las vigas 2 y 3 sanas y las vigas 1 y 2 deterioradas con respecto a la viga 1 sana en el sentido de medición T_T . Entre las vigas 3 sana y las vigas 1 y 2 deterioradas con respecto a la viga 3 sana en el sentido de medición T_T no existe diferencias significativas, ver figura 11.42.

11.19.4. Módulo de Young con de la Velocidad Longitudinal para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R para el Caso 2

Los valores de las mediciones del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal entre los dos grupos de madera en las vigas sanas y vigas deterioradas en el sentido de medición L_L presentó los valores más altos en la viga 1 sana y el valor más bajo en la viga 3 deteriorada. En cuanto a los valores en promedio por grupo se observó que las vigas 1 sana (el valor más alto de ambos

grupos) y la viga 1 deteriorada y las más bajas, la viga 3 sana y la viga 3 deteriorada (valores más bajos de ambos grupos), (ver figuras 11.43, 11.44 y 11.45).

La Correlación de la medición del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal en el sentido L_L muestra que entre la viga 3 deteriorada y la viga 1 sana no existen unas diferencias significativas entre ellas. En cambio, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre todas las otras vigas en el sentido L_L (ver anexo).

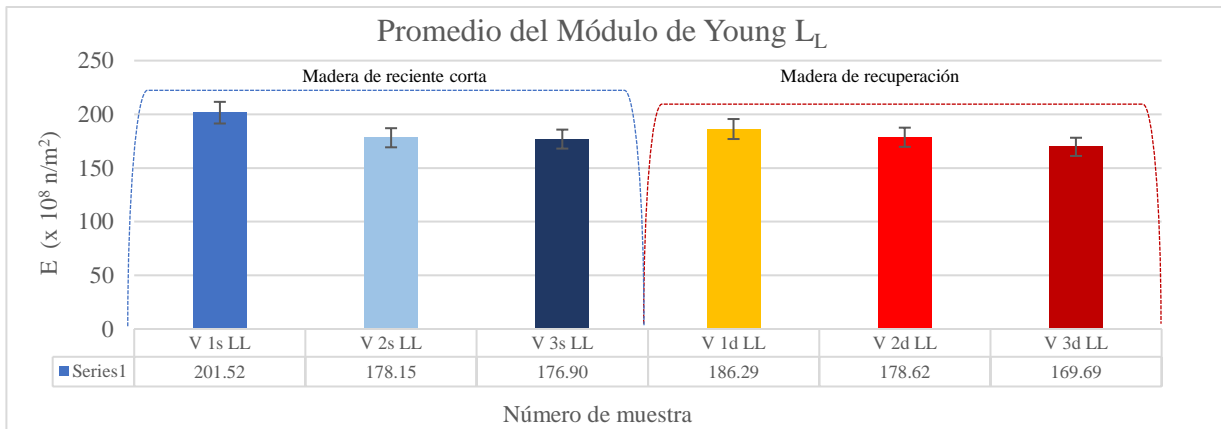


Figura 11. 41. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La Correlación del Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal en el sentido T_T muestra que entre la viga 1 deteriorada y las vigas 2 y 3 sanas no existen diferencias significativas, así como entre la viga 2 deteriorada y las vigas 2 sana y las vigas 1 y 3 deteriorada tampoco existe una diferencia significativa. La viga 1 sana y la viga 3 sana son estadísticamente diferente a todas las otras vigas de ambos grupos (ver anexo).

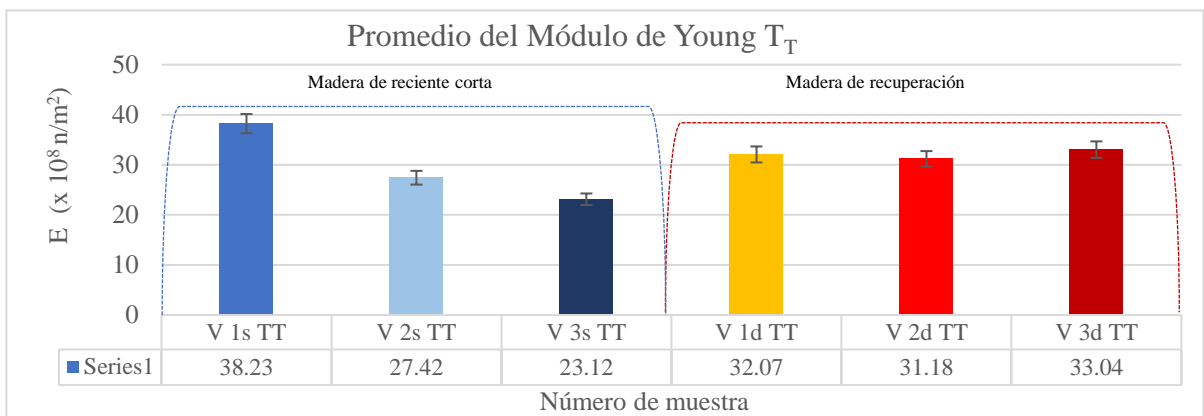


Figura 11. 42. Gráfica del promedio del Módulo de Young con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .

La Correlación del Módulo de Young en el sentido R_R muestra que entre la viga 1 deteriorada y las vigas 2 y 3 sanas no existen diferencias significativas, entre la viga 2 deteriorada y la viga 2 sana tampoco existió diferencia, como tampoco entre la viga deteriorada y la viga 3. La viga 1 sana es estadísticamente diferente a todas las otras vigas.

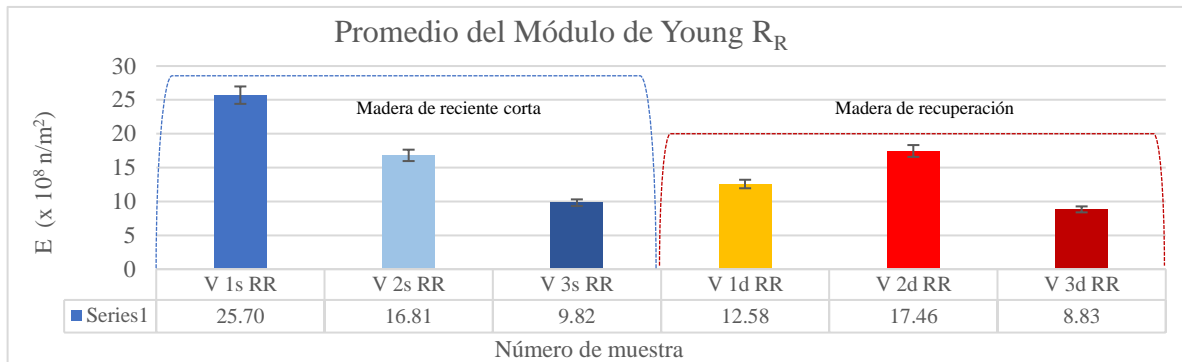


Figura 11. 43. Grafica de las mediciones del Módulo de Young de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .

Los valores más altos para la Velocidad Longitudinal para la madera deteriorada están presentes en la dirección L_L en todas las vigas y los más bajos en el sentido R_R . Los valores de la dirección L_L son el 50% más que los de la dirección R_R y entre T_T y R_R , las diferencias son mínimas. La Velocidad Longitudinal en todas las vigas de los dos grupos presenta valores mayores en el sentido longitudinal de medición (L_L), siendo el sentido con valores más bajos el radial (R_R).

El Módulo de Young presenta valores semejantes a los que la velocidad longitudinal nos presentó siendo los rangos mayores los que se observaron en el sentido longitudinal de medición (L_L), siendo el sentido con valores más bajos el radial (R_R). Tanto la Velocidad Longitudinal como el Módulo de Young en sus mediciones más altas (sentido L_L) son prácticamente el doble de los valores obtenidos en la dirección transversal.

11.19.4.1 Módulo de Young con la Velocidad Longitudinal de Ultrasonido para las muestras de los dos grupos de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R

En la figura 11.46 se presentan los valores promedio del Módulo de Young de los dos grupos de muestras. En el sentido longitudinal (L_L) de medición de la madera en todos los casos es el valor más alto esto debido a las características anatómicas propias de la madera (ver apartado 6.1-6.4) y el de menor valor es el sentido radial (R_R) para los dos grupos de vigas de madera.

La viga que presentó los valores más altos fue la viga 1 de madera sana y la viga con valores más bajos fue la viga 3 de la madera deteriorada. (ver anexo).

La Correlación del Módulo de Young medido usando la Velocidad Longitudinal de Onda, permite ver que entre las vigas 1, 2 y 3 sanas y deterioradas en los sentidos de medición T_T y R_R , existe una diferencia estadísticamente significativa entre las vigas 1, 2 y 3 sanas y deterioradas en el sentido L_L . Las vigas 2 y 3 sanas y 1, 2 y 3 deterioradas presentan una diferencia significativa con la viga 1 sana en el sentido T_T .

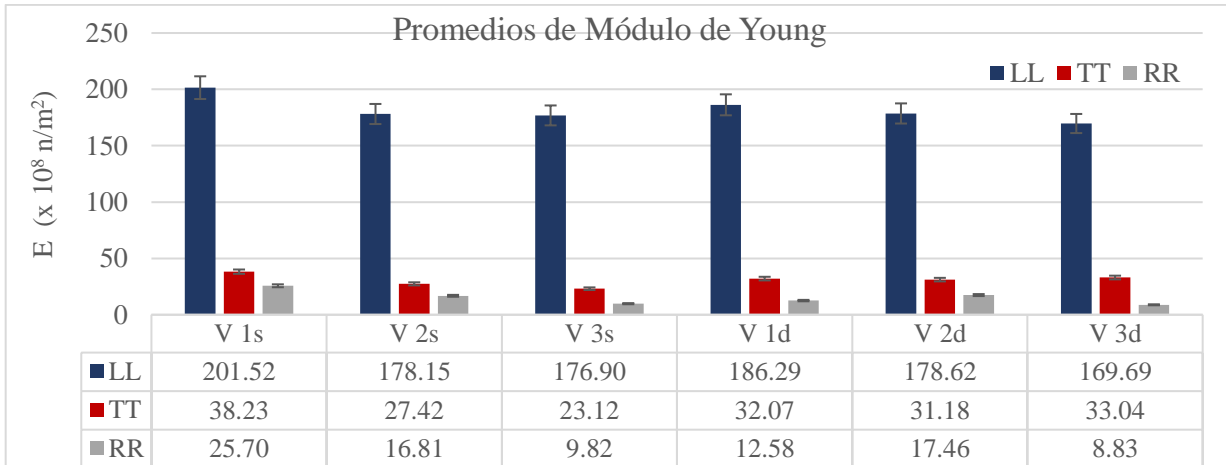


Figura 11. 44. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de los Módulos de Young por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.

En el caso de la viga 3 deteriorada en el sentido R_R se observó una diferencia estadísticamente significativa entre la viga 2 sana y las vigas 1, 2 y 3 deterioradas en el sentido T_T . La viga 3 sana en el sentido R_R presentó diferencias significativas con las vigas 1, 2 y 3 deterioradas en el sentido T_T . La viga 3 deteriorada en el sentido R_R también presentó diferencias en relación con las vigas 1 y 3 deterioradas en el sentido T_T . La magnitud de los coeficientes de Atenuación ultrasónica se midió en las tres direcciones: L_L , R_R y T_T .

Los valores más altos se presentaron en el sentido radial (R_R) en todas las muestras de los dos grupos de madera y los valores más bajos se presentaron en el sentido longitudinal (L_L) también en los dos grupos (ver anexo).

11.19.5. Atenuación con de la Velocidad Longitudinal para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R

Las siguientes gráficas 11.47, 11.48 y 11.49 presenta los valores de las mediciones de la Atenuación con la Velocidad Longitudinal entre los dos grupos de madera realizadas en las vigas

sanas y vigas deterioradas en el sentido de medición L_L , los valores más altos los presentó la viga 1 deteriorada y el valor más bajo lo obtuvo la viga 3 deteriorada.

La correlación de la Atenuación en el sentido L_L muestra que entre la viga 1 deteriorada y las vigas 2 y 3 deterioradas existen diferencias significativas, así como entre la viga 2 deteriorada y la viga 1 deteriorada existieron diferencias y entre la viga 3 deteriorada y la viga 1 deteriorada también existieron diferencias estadísticamente significativas, siendo estas las únicas diferentes entre sí.

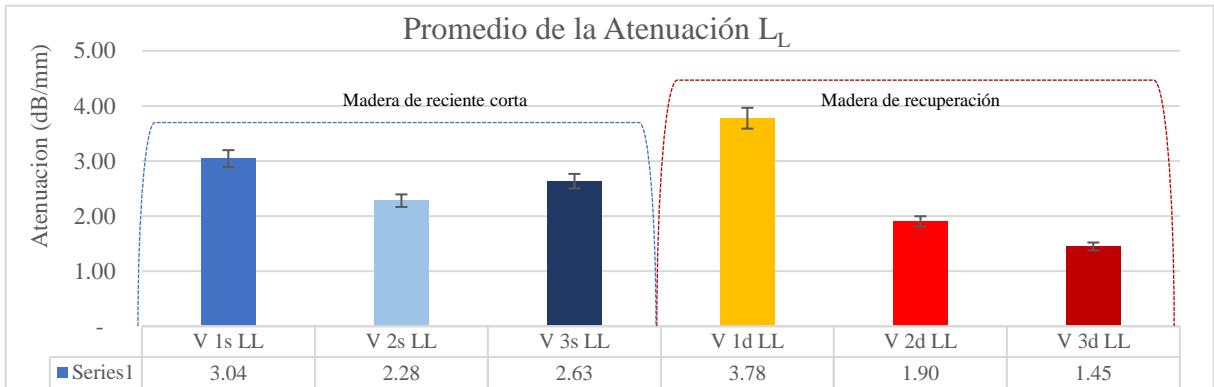


Figura 11. 45. Gráfica del promedio de la atenuación con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_L .

La correlación de la Atenuación en el sentido T_T muestra que entre la viga 1 deteriorada y las vigas 2 y sana y la 3 sanas existen diferencias significativas, la viga 2 deteriorada y la viga 1 deteriorada existen diferencias. La viga 3 sana tiene diferencias significativas entre ella y la viga 1 deteriorada, pero entre las otras vigas de ambos grupos no existió una diferencia estadísticamente significativa. (ver anexo).

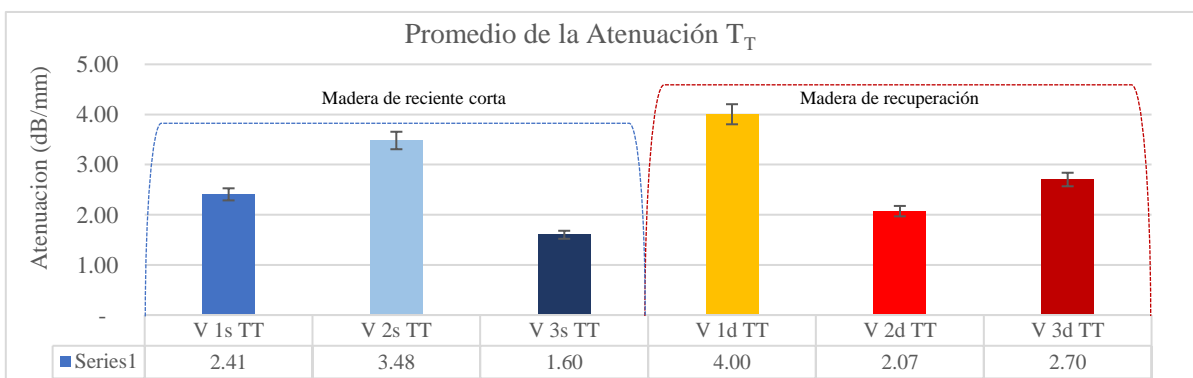


Figura 11. 46. Gráfica del promedio de la Atenuación (b) con la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_T .

La correlación en el sentido R_R para la Atenuación muestra que entre la viga 1 sana y la viga 2 sana no existe diferencia, tampoco entre la viga 2 sana y la viga 2 deteriorada. La viga 3 sana cuenta con una diferencia significativa entre las vigas 1 sana y la viga 3 deteriorada. La viga 1 deteriorada solo es diferente con la viga 1 sana al igual que la viga 2 deteriorada. (ver anexo).

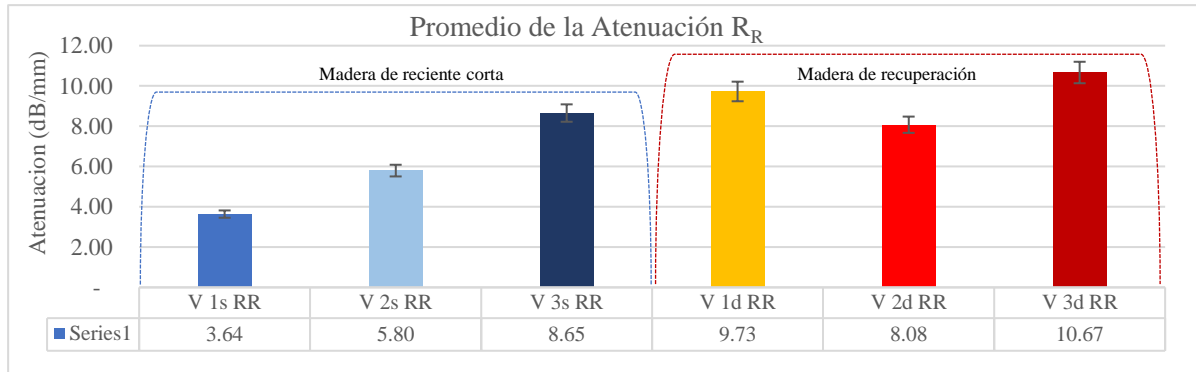


Figura 11. 47. Gráfica del promedio de la Atenuación (b) con de la velocidad longitudinal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_R .

11.19.5.1. Atenuación con la Velocidad Longitudinal empleando Ultrasonido para las

muestras de los dos grupos de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_L , T_T y R_R

La medición de la Atenuación Ultrasonica utilizando la velocidad longitudinal en las tres caras de los dos grupos de muestras nos dan promedios en los cuales podemos observar que la viga que presenta una mayor perdida es la viga 1 del grupo de material deteriorado que presentó los valores más altos en los sentidos de medición L_L y T_T , la viga 3 del grupo de la madera deteriorada es la que presentó el valor más alto en el sentido R_R , ver figura 11.50.

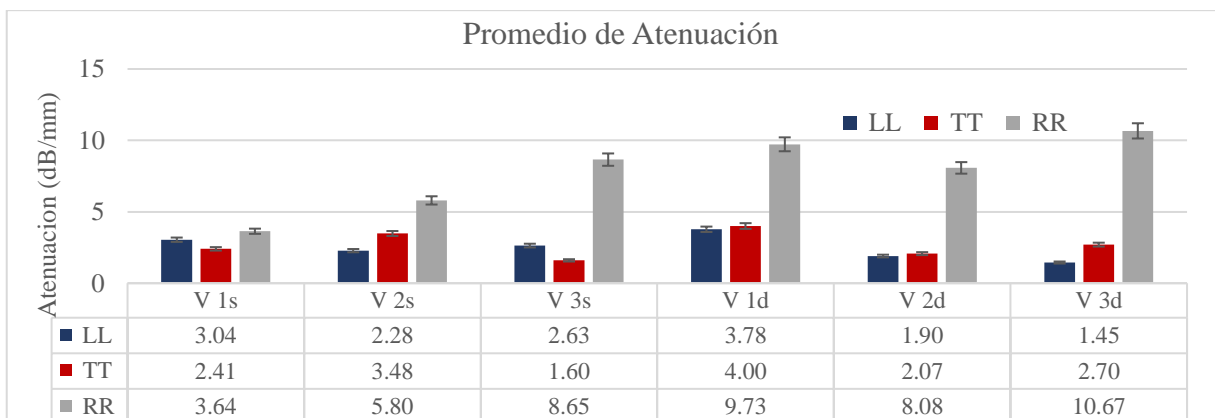


Figura 11. 48. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de la Atenuación por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.

La Correlación en la medición de la Atenuación Ultrasonica utilizando la Velocidad Longitudinal para ambos grupos de vigas en los tres sentidos de medición indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las vigas 3 sana, 1, 2 y 3 deterioradas en el sentido R_R y las vigas 1, 2 y 3 sanas y deterioradas en los sentidos L_L y T_T y con las vigas 1 y 2 sanas en el sentido R_R .

11.19.6. Velocidad Transversal por medio de Ultrasonido para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T

Los resultados de las mediciones de la velocidad Transversal, el módulo de Corte y la Atenuación en las direcciones longitudinal radial (L_R), longitudinal transversal (L_T), transversal longitudinal (T_L), transversal radial (T_R) y radial longitudinal (R_L) y radial transversal (R_T), de las mediciones realizadas en cada una de las seis vigas seleccionadas de ambos grupos de vigas sanas y vigas deterioradas, se presentan en este apartado.

Los valores de las mediciones con la Velocidad Transversal entre los dos grupos de madera en las vigas sanas y vigas deterioradas se observan en las figuras 11.51, 11.56.

La Velocidad Transversal ultrasónica en el sentido de medición L_T presentó los valores más altos en la viga 3 sana y el valor más bajo en la viga 1 sana. En cuanto a los valores en promedio por grupo se observó que las vigas 3 sana (el valor más alto de ambos grupos) y la viga 2 deteriorada y las más bajas, la viga 3 deteriorada y la viga 1 sana (valores más bajos de ambos grupos).

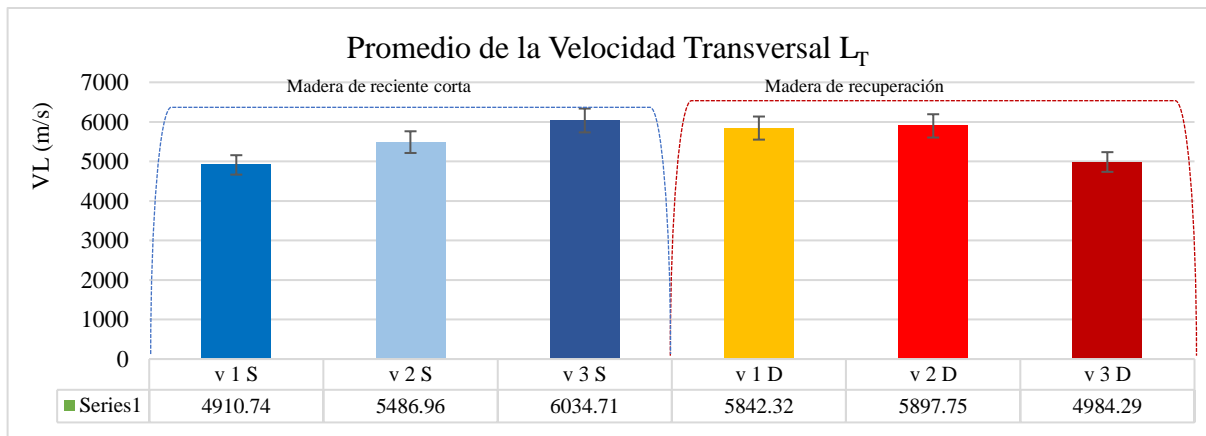


Figura 11. 49. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .

La Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido L_R muestra que entre la viga 1 sana existen diferencias entre las vigas 1 sana y las vigas 2 y 3 deterioradas, la viga 2 sana existe diferencia significativa con la viga 3 sana y la viga 3 deteriorada, en tanto que entre la viga 3

deteriorada existen diferencias significativas con todas las vigas, la viga 1 deteriorada solo presenta diferencias significativas con la viga 3 deteriorada, siendo esta la más semejante al resto.

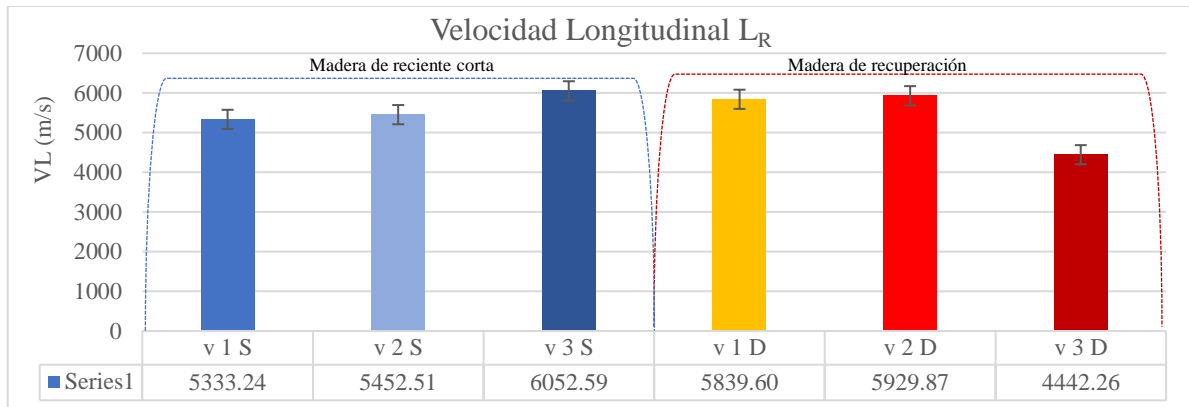


Figura 11. 50. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .

La Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido T_L muestra que entre la viga 3 deteriorada y todas las otras (vigas 1, 2 y 3 sanas y vigas 1 y 2 deterioradas) existen diferencias significativas, así como entre la viga 3 sana y las vigas 1 y 3 deteriorada la viga 1 y 2 deterioradas presentan diferencias significativas con la viga 2 sana y la viga 1 deteriorada con la viga 3 sana. Entre las vigas sanas no se encontró una diferencia significativa entre ellas.

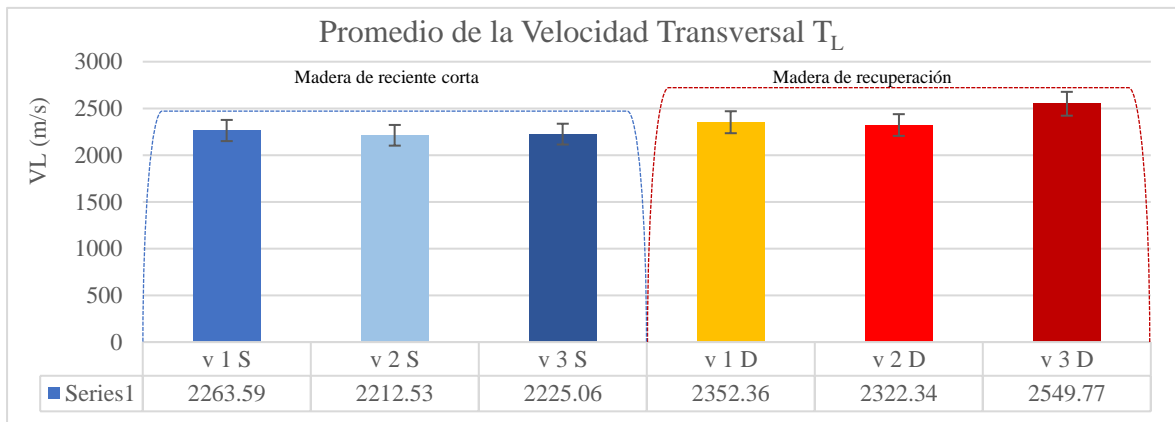


Figura 11. 51. Gráfica del promedios de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .

La Correlación de la Velocidad transversal en el sentido T_R muestra que entre las vigas 1, 2 y 3 sanas existe una diferencia significativa en relación con las vigas 1, 2 y 3 deterioradas, entre las vigas deterioradas existe diferencias significativas únicamente entre las vigas 2 y 3. Y tanto que entre el grupo de vigas sanas no existe diferencias estadísticamente significativas.

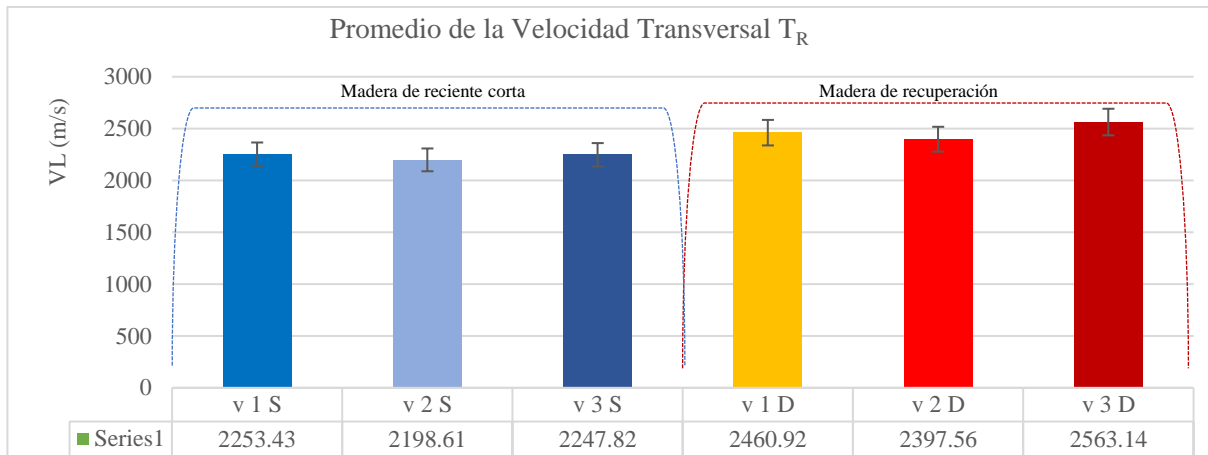


Figura 11. 52. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .

La correlación de la Velocidad Transversal en el sentido R_T muestra que entre los dos grupos de vigas tanto sanas como deterioradas existe una diferencia significativa entre la viga 1 sana y todas las demás, así como entre la viga 3 deteriorada y todas, pero entre las vigas 2 y 3 sanas y las vigas 2 y 3 no existe diferencias significativas entre ninguna de ellas.

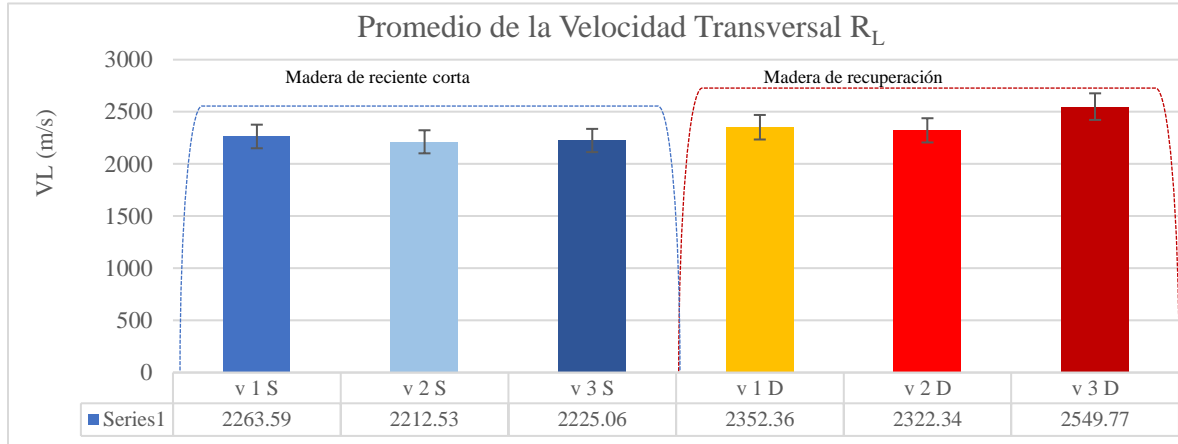


Figura 11. 53. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .

La Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido R_L muestra que entre la viga 1 sana y las vigas 2 y 3 sanas y las vigas 1, 2 y 3 deterioradas existen diferencias significativas, así como también existieron diferencias significativas entre la viga 3 deteriorada y las vigas 1, 2 y 3 sanas y la viga 2 deteriorada. La viga 1 deteriorada no muestra diferencias significativas con las otras vigas excepto la viga 1 sana. (ver anexo).

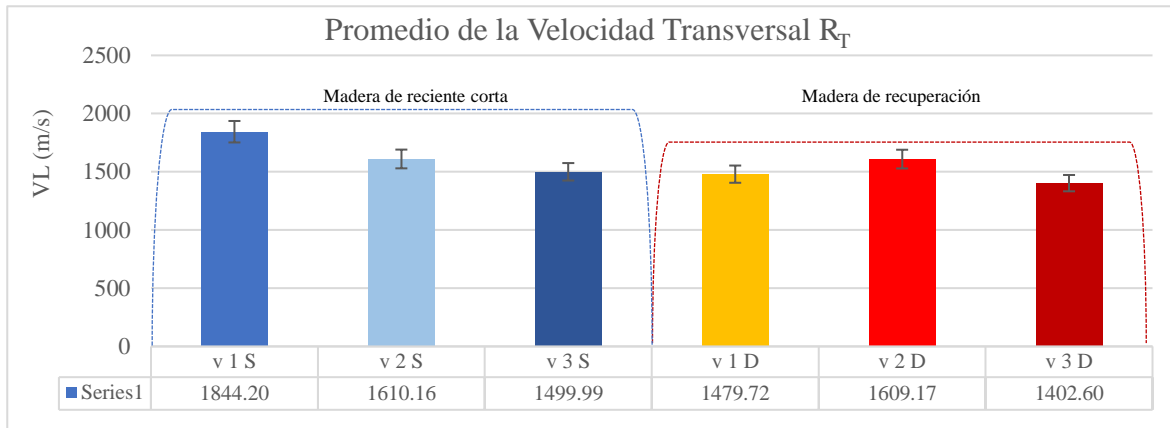


Figura 11. 54. Gráfica del promedio de la velocidad transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_L .

11.19.6.1. Velocidad Transversal para las muestras de los dos grupos de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T

Los valores promedio de los dos grupos. La velocidad Transversal en el sentido longitudinal (L_T y L_R) de medición de la madera en todos los casos es el más alto y el de menor valor es en el sentido radial (R_L y R_T) para los dos grupos.

La Correlación de la Velocidad Longitudinal en los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T muestra que entre la viga sana 1 en el sentido L_R muestra diferencias significativas con casi todas las vigas excepto con la viga 1 sana L_T , la viga 2 sana en los sentidos de medición L_R y L_T , la viga sana 3 en los sentidos L_R y L_T , la viga 1 deteriorada en los sentidos L_R y L_T , la viga deteriorada 2 en los sentidos L_R y L_T y con la viga deteriorada 3 en el sentido L_T .

La viga sana 2 el sentido L_T y L_R muestra diferencias estadísticamente significativas con todas las otras vigas excepto con las vigas sana 1 en el sentido L_R y L_T , la viga sana 3 en el sentido L_R y L_T , la viga 1 deteriorada en el sentido L_R y L_T , la viga deteriorada 2 en el sentido L_T y la viga 3 deteriorada en el sentido L_T . La viga 2 sana el sentido T_L y T_R muestra diferencias estadísticamente significativas con las vigas 1 sana en el sentido L_R y L_T , la viga sana 2 en el sentido L_R y L_T , la viga sana 3 en el sentido L_R , L_T , R_L y R_T , la viga deteriorada 1 en el sentido L_R y L_T , la viga deteriorada 2 en el sentido L_T y L_R y la viga deteriorada 3 en el sentido L_T , L_R , R_L y R_T .

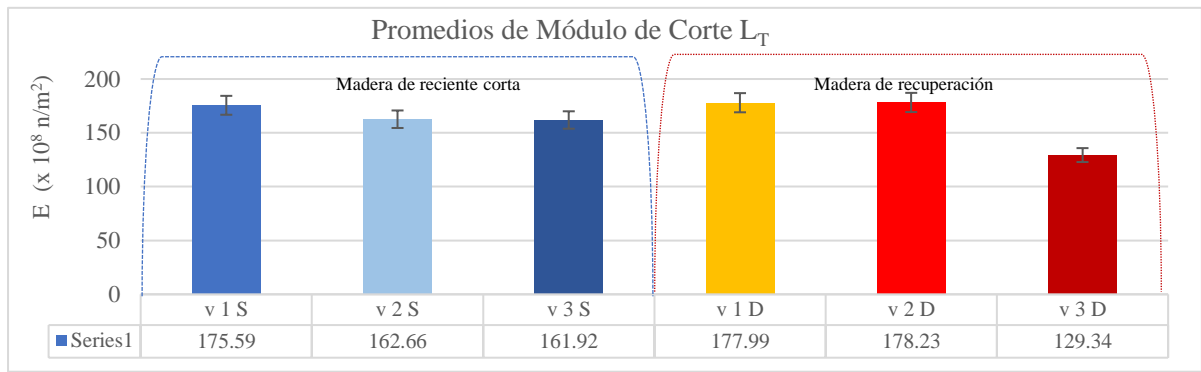


Figura 11. 55. Gráfica del promedio de mediciones de la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición.

11.19.7. Módulo de Corte con de la Velocidad Transversal para las muestras de Madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_R , L_T , T_L , T_R , R_L y R_T

Las gráficas 11.58 a 11.63 presentan los valores de las mediciones del Módulo de Corte con la Velocidad Longitudinal entre los dos grupos de madera en las vigas sanas y vigas deterioradas. La Correlación del Módulo de Corte con la Velocidad Transversal en el sentido L_T muestra que solo se encontró entre la viga 3 deteriorada y las vigas 1 sanas y las vigas 1 y 2 deterioradas diferencias estadísticamente significativas. Entre las vigas 1 y 2 sanas no existe ninguna diferencia significativa entre las otras vigas. (ver anexo).

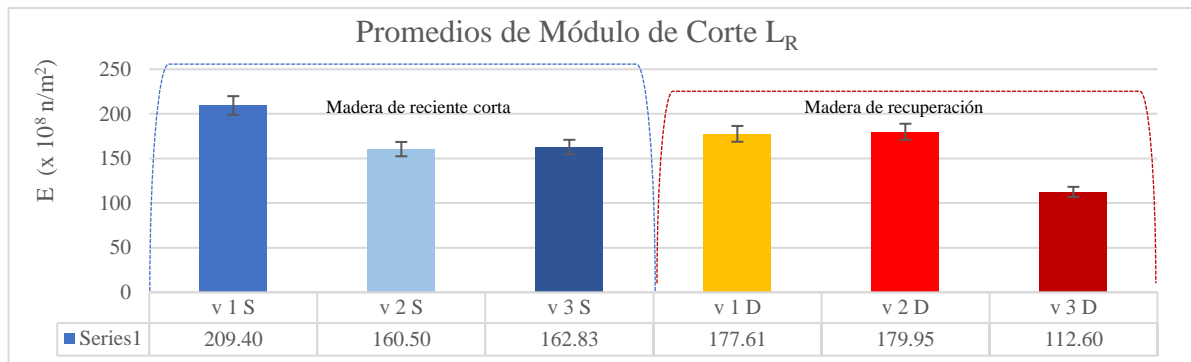


Figura 11. 56. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .

La Correlación del Módulo de Corte con la Velocidad Transversal en el sentido L_R muestra que solo se encontró entre la viga 3 deteriorada y las vigas 1 sanas y las vigas 1 y 2 deterioradas diferencias estadísticamente significativas. Entre las vigas 1 y 2 sanas no existe ninguna diferencia significativa entre las otras vigas. Los resultados son semejantes a los presentados en el sentido L_R , (ver anexo).

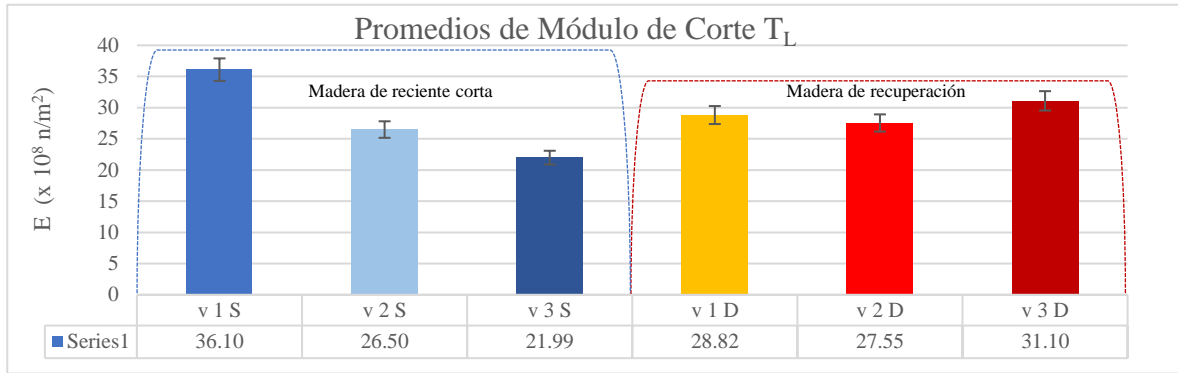


Figura 11. 57. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .

La Correlación de la medición del Módulo de Corte con la Velocidad Transversal en el sentido T_L muestra que entre las vigas 1 y 3 sana y todas las vigas existen diferencias significativas entre ellas. Entre las vigas 2 sanas existen diferencias significativas con la viga 3 sana y la viga 3 deteriorada. Las vigas 1 y 2 deterioradas presentan diferencias con las vigas sanas 1 y 3. La viga 3 deteriorada presenta diferencias significativas entre las vigas sanas 1, 2 y 3 (ver anexo).

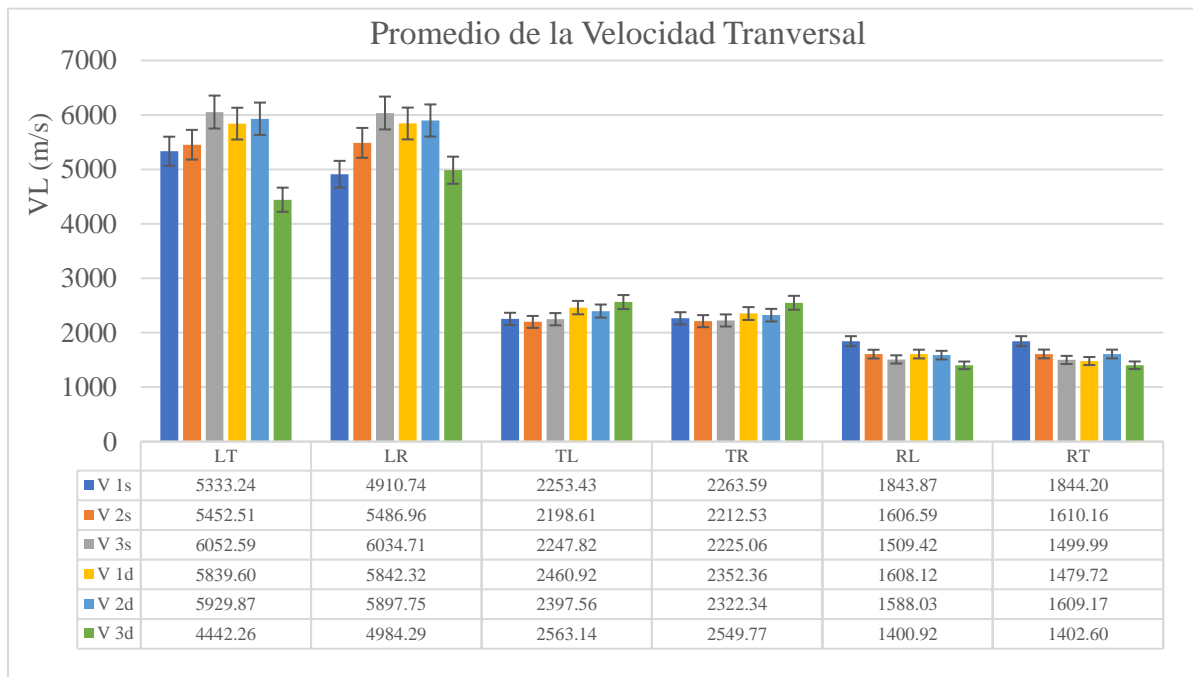


Figura 11. 58. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .

La Correlación del Módulo de Corte en el sentido T_R muestra que entre la viga sana 1 y las vigas sana 3 y las vigas deterioradas 1, 2 y 3 existen diferencias significativas, entre la viga sana 2 y la viga sana 1, las vigas deterioradas 1 y 3 si existe diferencia, y la viga sana 3 presentó diferencias con la viga sana 1 y las vigas deterioradas 1, 2 y 3. Las vigas deterioradas 1 y 2 son diferente estadísticamente con la viga sana 1 y 2. La viga deteriorada 3 es diferente estadísticamente con las vigas sanas 1, 2 y 3 (ver anexo).

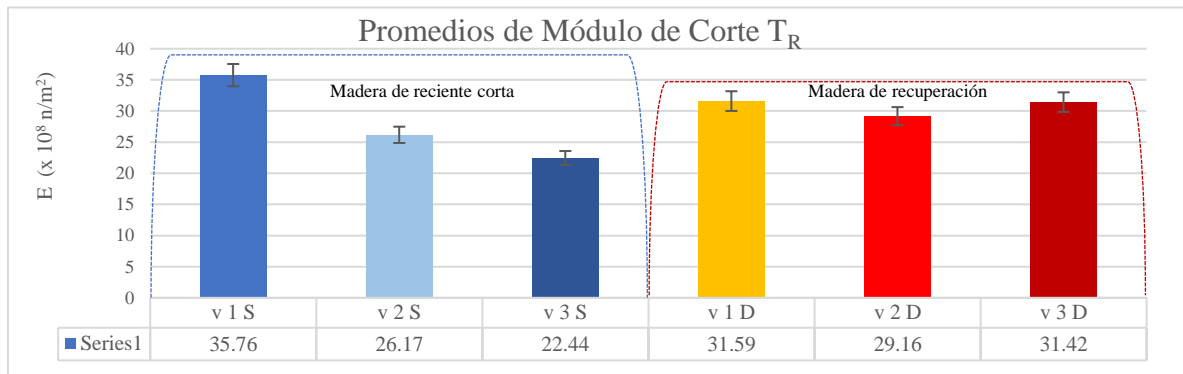


Figura 11. 59. Gráfica del promedios del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .

La Correlación del Módulo de Corte en el sentido R_L muestra que la viga sana 1 presenta diferencias significativas entre todas las otras vigas, entre la viga sana 2 y la viga sana 1 y la viga deterioradas 3 si existe diferencia. La viga sana 3 presentó diferencias con la viga sana 1 y la viga deterioradas 3. Las vigas deterioradas 1 y 2 son diferente estadísticamente con la viga sana 1. La viga deteriorada 3 es diferente estadísticamente con las vigas sanas 1 y 2 y la viga deteriorada 1. La viga sana 2 solo presentó diferencias significativas con la viga sana 1. (ver anexo).

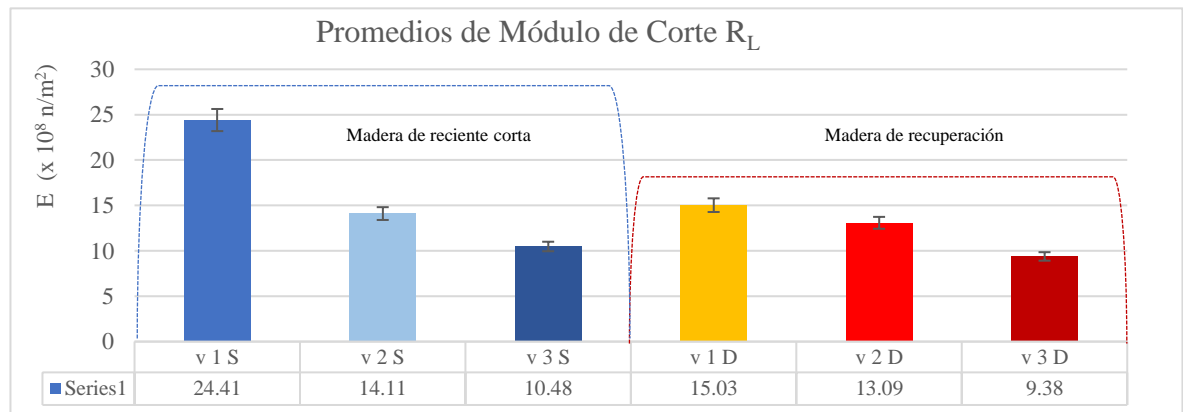


Figura 11. 60. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos.

La Correlación del Módulo de Corte en el sentido R_T muestra que la viga sana 1 presenta diferencias significativas con las vigas sanas 3 y la viga deteriorada 3. La viga deteriorada 1 muestra diferencias significativas con la viga deteriorada 2. Las vigas sana 2 y la viga deteriorada 3 no presentaron ninguna diferencia significativa entre ninguna de las otras vigas.

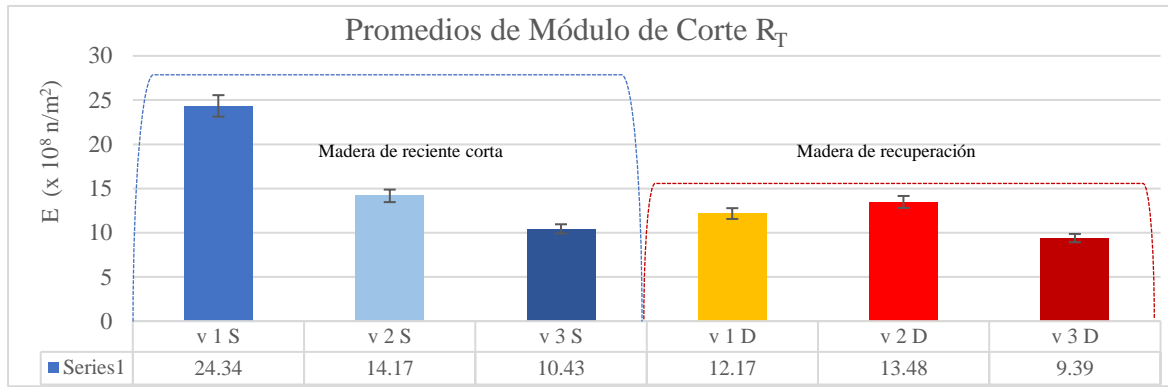


Figura 11. 61. Gráfica del promedio del Módulo de Corte con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .

El Módulo de Corte presenta valores semejantes a los que la velocidad transversal siendo los rangos mayores los que se observaron en el sentido longitudinal transversal y el longitudinal radial de medición, siendo los sentidos con valores más bajos el radial longitudinal y el radial transversal. Tanto la Velocidad Transversal como el Módulo de Corte en sus mediciones más altas (sentido L_T y L_R) son prácticamente el doble de los valores obtenidos en la dirección transversal (T_L y T_R).

En tanto que entre la dirección trasversal (T_L y T_R). de medición y la dirección radial (R_L y R_T) la diferencia es muchísimo menor. La Atenuación para cada uno de los sentidos de medición (L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T), presentó el fenómeno inverso a la de la Velocidad Transversal y el Módulo de Corte, siendo el más alto el sentido R_L y R_T y el más bajo el sentido L_R y L_T . (ver anexo).

11.19.7.1 Velocidad Transversal, el Módulo de Corte y la Atenuación para las muestras de los dos grupos de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T

En la figura 11.64 se presentan los valores promedio del Módulo de Corte de los dos grupos de madera. En el sentido longitudinal (L_T y L_R), transversal (T_L y T_R) y radial (R_L y R_T) de medición de la madera. En todos los casos es el valor más alto se presentó en el sentido L_T y el de menor valor es el sentido radial (R_L y R_T) para los dos grupos. (ver anexo).

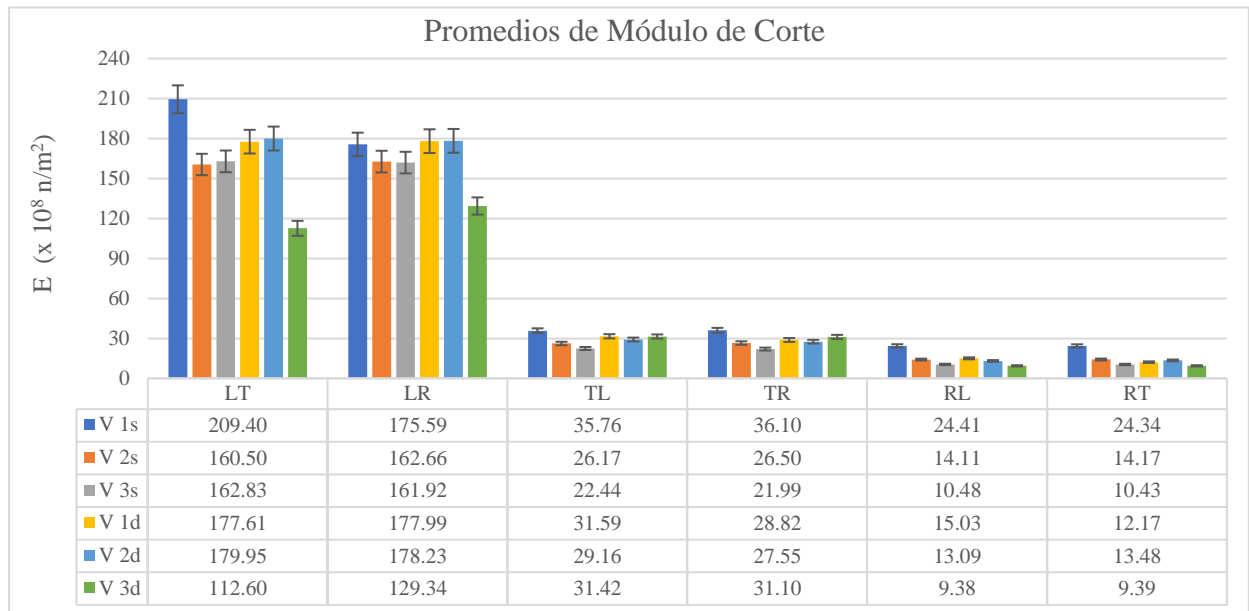


Figura 11. 62. Gráfica del promedio de mediciones de las mediciones de los Módulos de Young por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.

La Correlación del Módulo de Corte medido usando la Velocidad Transversal de onda muestra que la viga sana 1 en el sentido L_R muestra diferencias significativas con casi todas las vigas excepto con la viga 1 deteriorada en los sentidos L_R y L_T y la viga deteriorada 2 en los sentidos L_R y L_T .

La viga sana 1 en el sentido L_T muestra diferencias significativas con casi todas las vigas excepto con la viga sana 3 en los sentidos de medición L_R y L_T , la viga deteriorada 1 en los sentidos L_R y L_T y con la viga deteriorada 2 en el sentido L_R (ver anexo).

11.19.8. Atenuación con de la Velocidad Transversal para las muestras de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T

Las gráficas 11.65 a la 11.70 presentan los valores de las mediciones de la Atenuación con la Velocidad Transversal entre los dos grupos de madera en las vigas sanas y vigas deterioradas.

La Correlación de la Atenuación en el sentido L_T muestra que entre la viga sana 2 y las vigas sana 1 y las vigas deterioradas 1, 2 y 3 existe diferencias significativas; la viga deteriorada 1 presenta diferencias significativas con la correlación de la Atenuación en el sentido L_T muestra que entre la viga sana 2 y las vigas sana 1 y las vigas deterioradas 1, 2 y 3 existe diferencias significativas; la viga deteriorada 1 presentó diferencias significativas con las vigas sanas 1, 2 y 3 y la viga deteriorada 3. (ver anexo).

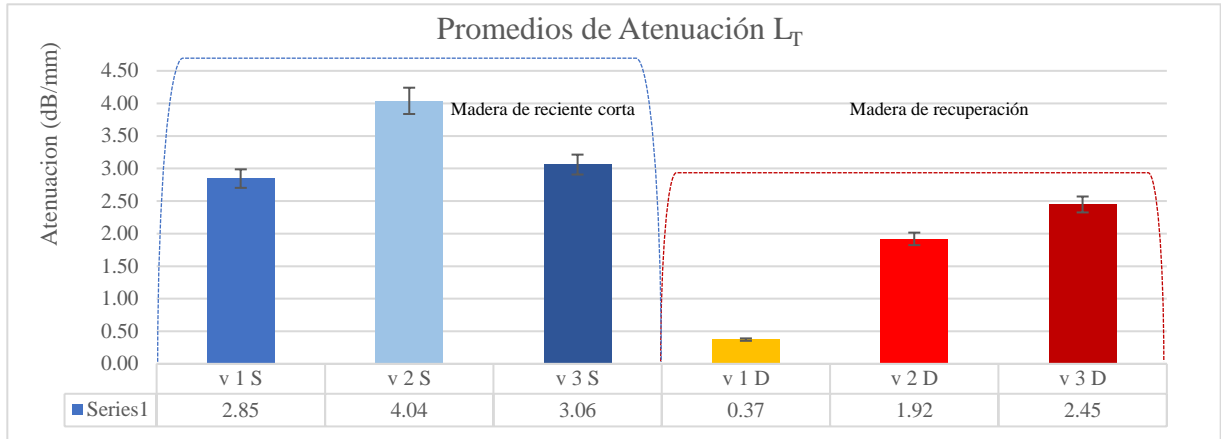


Figura 11. 63. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_T .

Los valores de la Atenuación empleando la Velocidad Transversal ultrasónica en el sentido de medición L_R presentó los valores más altos en la viga sana 2 y el valor más bajo en la viga deteriorada 3. En cuanto a los valores en promedio por grupo se observó que las vigas sana 2 (el valor más alto de ambos grupos) y la viga deteriorada 3 y las más bajas, la viga deteriorada 1 (valores más bajos de ambos grupos) y la viga sana 1.

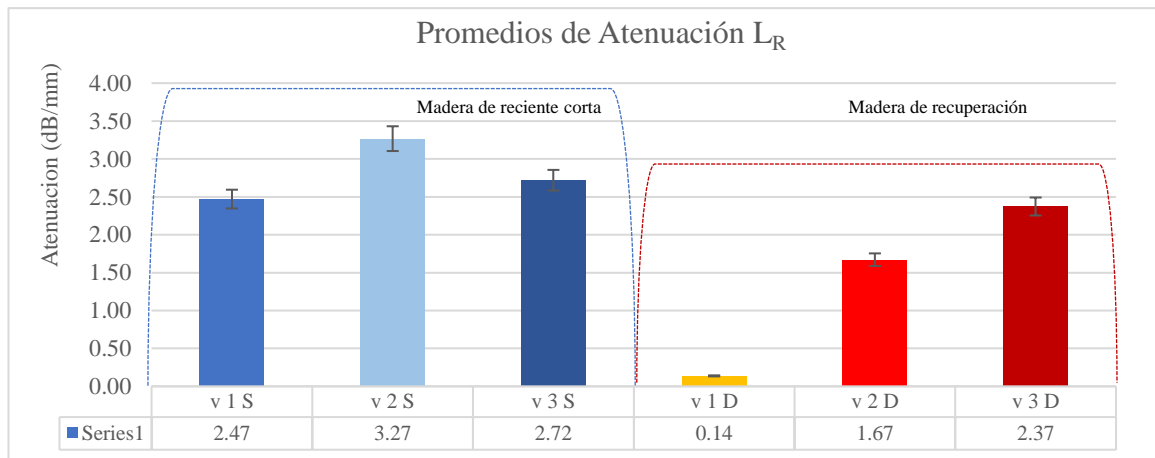


Figura 11. 64. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido L_R .

La Correlación de la Atenuación en el sentido T_L muestra que entre la viga deteriorada 1 presenta diferencias significativas con las vigas sanas 1, 2 y 3, la viga deteriorada 2 presento diferencias significativas con la viga sana 3, la viga deteriorada 1 es estadísticamente diferente a la viga sana 1. Las vigas deterioradas 2 y 3 presentaron valores estadísticamente significativos diferentes con la viga sana 3.

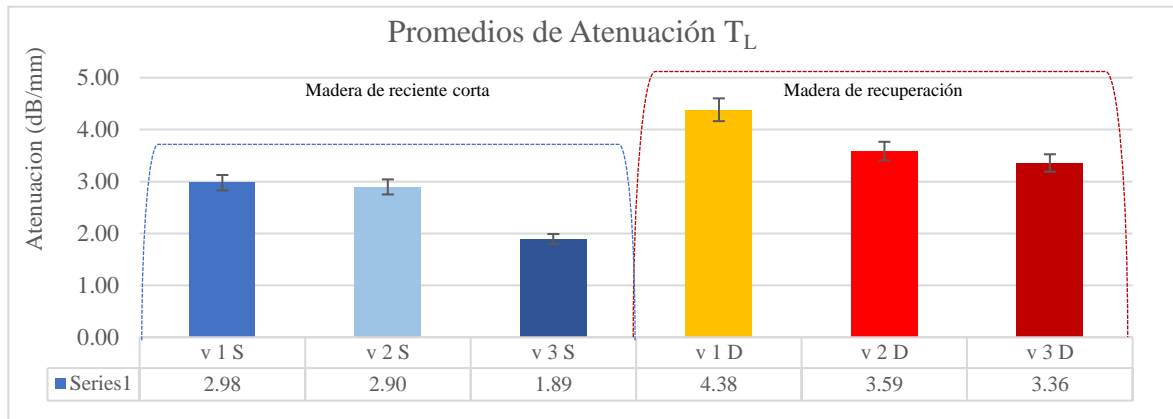


Figura 11. 65. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_L .

La Correlación de la Atenuación en el sentido T_R muestra que entre la viga deteriorada 1 muestra diferencias significativas entre todas las demás vigas. La viga sana 2 y la viga deteriorada 2 presentaron diferencias significativas. La viga deteriorada 3 no presentó ninguna diferencia significativa con ninguna otra viga. (ver anexo).

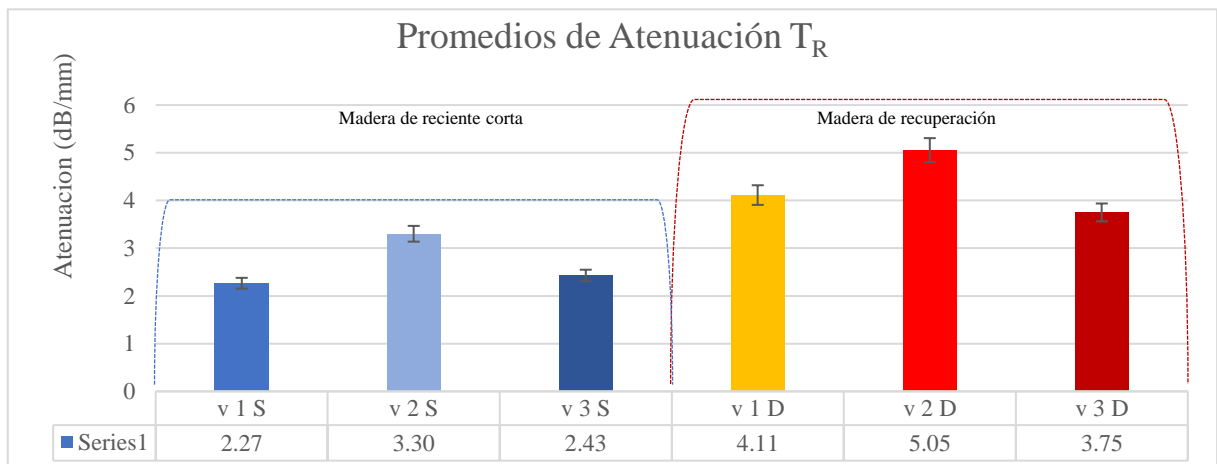


Figura 11. 66. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido T_R .

La Correlación de la Atenuación en el sentido R_L muestra que entre la viga sana 1 existen diferencias significativas con todas las otras vigas exceptuando a la viga deteriorada 1, la viga deteriorada 1 presenta diferencias significativas con la viga deteriorada 2. (ver anexo).

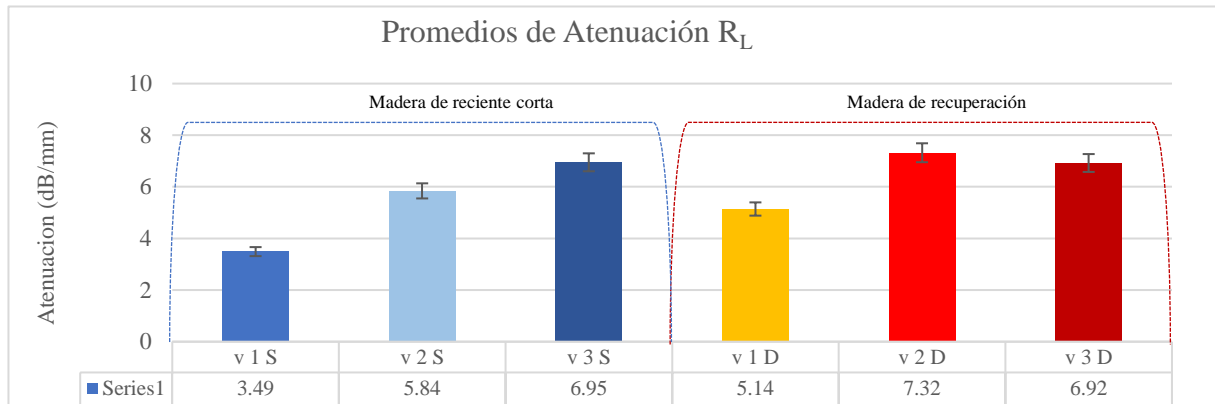


Figura 11. 67. Grafica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_L .

La Correlación en el sentido R_T para la Atenuación muestra que entre la viga sana 1 existe diferencia con la viga sana 3 y la viga deteriorada 3. La viga deteriorada 1 cuenta con una diferencia significativa entre la viga deteriorada 2. La viga sana 2 y la viga deteriorada 3 no presentan diferencias significativas con ninguna de las otras vigas. (ver anexo).

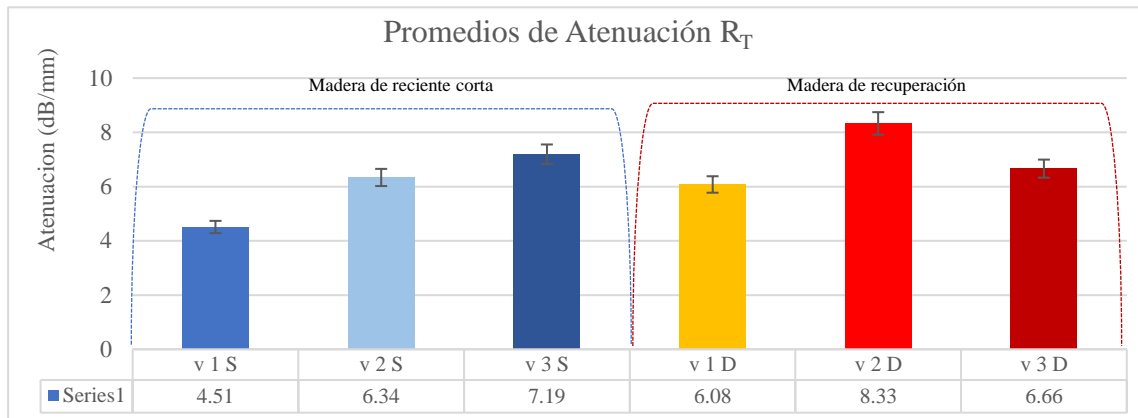


Figura 11. 68. Gráfica del promedio de la Atenuación con la velocidad Transversal por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera en el sentido R_T .

11.19.8.1. Atenuación Ultrasonica para los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición

La magnitud de los Coeficientes de Atenuación Ultrasonica se midió en las tres direcciones: L_T y L_R , R_L y R_T y T_L y T_R . Los valores más altos se presentaron en el sentido radial (R_L y R_T) en todas las muestras de los dos grupos de madera y los valores más bajos se presentaron en el sentido longitudinal (L_T y L_R) también en los dos grupos (ver figura 11.71).

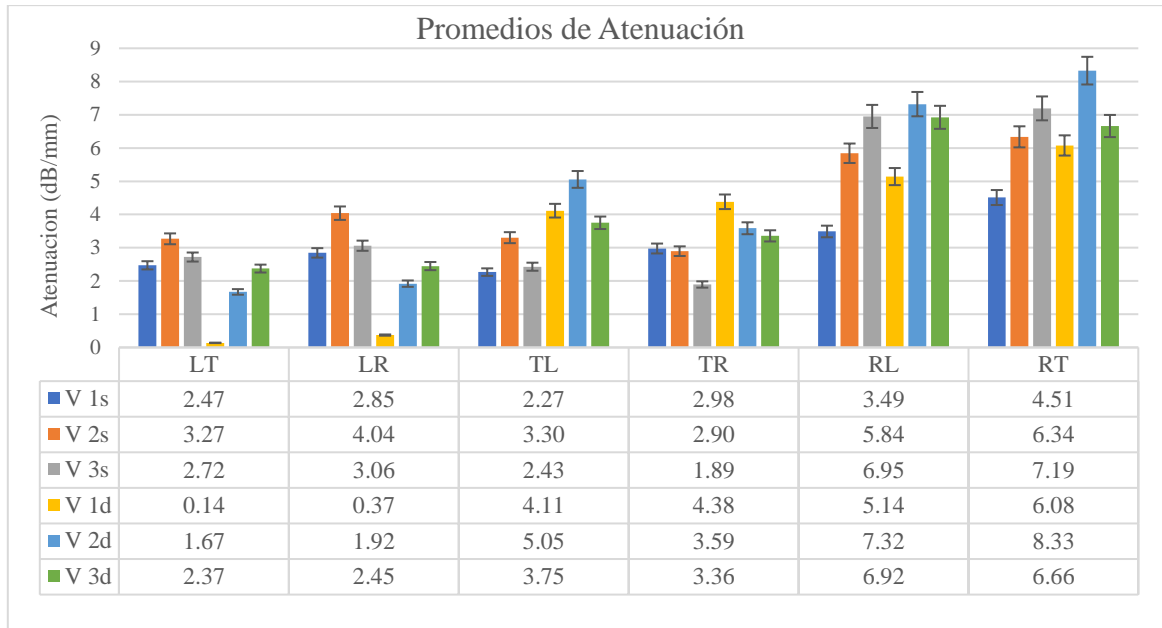


Figura 11. 69. Gráficas del promedio de mediciones de las mediciones de la Atenuación por medio de ultrasonido para ambos grupos de madera.

La Correlación en la medición de la Atenuación Ultrasonica utilizando la Velocidad Transversal para ambos grupos de vigas en los tres sentidos de medición indican que existe una diferencia estadísticamente entre la viga sana 1 en el sentido LR y TR muestra diferencias significativas con la viga sana 2 en el sentido de medición RL y RT, con la viga sana 3 en el sentido RL y RT, con la viga deteriorada 1 en el sentido LR, RL y RT, con la viga deteriorada 2 en el sentido de medición TR, RL y RT, y con la viga deteriorada 3 en todas las direcciones de medición. (ver anexo).

11.20. Resultados y discusión del Análisis estadístico de los datos obtenidos *in situ* y en laboratorio para las pruebas de Ondas de Esfuerzo y Ultrasonido para el Caso 2

Para todas las variables (H , ρ_H , v_{RT} , E_{RT} , v_L , E_L , E_{RT} y E_L) correspondientes a las dos muestras estudiadas (vigas sanas y vigas deterioradas) los valores de *skewness* y *kurtosis* indican que las distribuciones fueron estadísticamente normales. Igualmente, las verificaciones de la varianza y su análisis permiten concluir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las magnitudes de los parámetros estudiados en las dos muestras, excepto para el contenido de humedad y la rigidez en las direcciones radial y tangencial.

11.20.1 Velocidad calculada por medio de Ondas de Esfuerzo y Ultrasonido con la técnica de emisión transmisión

Los resultados del análisis estadístico muestran que no existen diferencias significativas entre las velocidades de onda de las vigas sanas (madera de reciente corta) y las vigas deterioradas (madera de recuperación) tanto para la dirección radial y tangencial, como para la dirección longitudinal. Las velocidades de onda en la dirección radial y tangencial de las vigas sanas fueron menores que las medidas en las vigas sanas en un 9% y su coeficiente de variación aumentó 23%. Las velocidades de onda en la dirección longitudinal de las vigas sanas fueron mayores que las correspondientes a las vigas deterioradas en un 8.4%, pero su coeficiente de variación disminuyó 63%.

Los resultados en la dirección radial y tangencial indican que las mediciones de la velocidad de onda en las secciones transversales de las vigas son más sensibles a las variaciones locales de la estructura y la calidad aparente de la madera. Sin embargo, las mediciones en la dirección longitudinal de las vigas son más homogéneas en comparación con las de la dirección radial y tangencial (Carrillo, Sotomayor y Raya 2019 b). Las velocidades de onda en la dirección longitudinal fueron mayores respecto a las de la dirección radial y tangencial en un factor de 3.7 para las vigas sanas y de 3.1 para las vigas deterioradas. Estos resultados son similares a los radios de anisotropía medidos en madera de diferentes especies de madera reportados por Dackermann *et al.*, (2014).

La velocidad de onda se usa como indicador del módulo de Young en una pieza de madera (Yamasaki *et al.*, 2010). De tal forma que, si no difieren considerablemente las magnitudes de las velocidades de onda de la madera deteriorada en comparación con otra pieza de madera sana, ambas de una misma especie y con contenidos de humedad similares, se puede proponer que su resistencia mecánica es equivalente (Morales y Machado, 2017). Así, los resultados de esta investigación sugieren que, si bien existe una variabilidad a nivel local, en su conjunto las diferencias no son significativas, tanto para las mediciones en campo (mediciones con Ondas de Esfuerzo), como en laboratorio (mediciones con Ultrasonido).

A continuación, se muestran las gráficas de los promedios de las mediciones efectuadas con los dos equipos de medición empleando Ondas de Esfuerzo (*in situ*) y Ultrasonido (laboratorio) con el tipo de onda longitudinal para las direcciones L_L y T_R .

Las figuras 11.70 y 11.71 muestra ambas técnicas de medición no destructivas empleadas, en la cual se observa que en la técnica de ultrasonido en el sentido longitudinal ($L_{LS} u$) y la técnica de ondas de esfuerzo en el sentido longitudinal ($L_{LS} e$) para el grupo de vigas sanas existe una

diferencia del 18.9%, para la misma dirección del grupo de vigas deterioradas (L_Ld u y L_Ld e) existe una diferencia entre ellas de un 15.8% entre ambos grupos de vigas aplicando las dos técnicas existe una diferencia de 19.5%.

Promedios de la Velocidad Longitudinal (Ondas de esfuerzo y Ultrasonido).

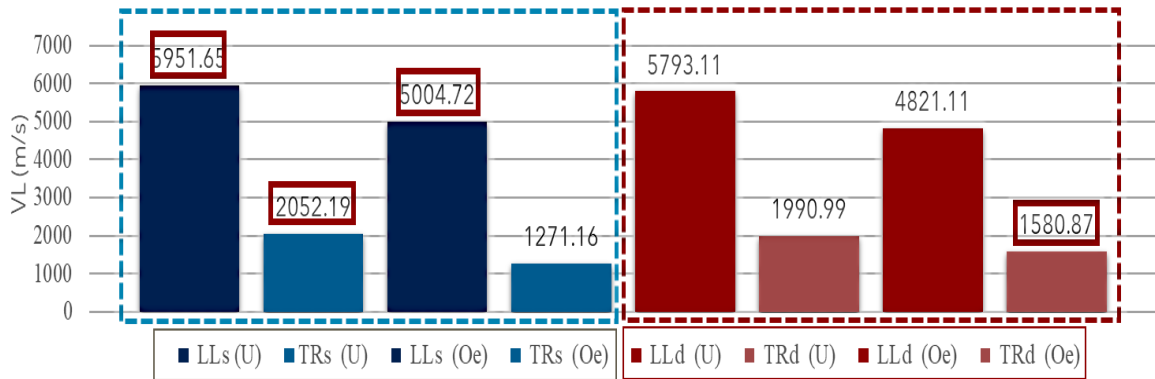


Figura 11. 70. Promedios de las mediciones de la velocidad longitudinal en las direcciones longitudinal (L_L), tangencial- radial (T_R) de las vigas sanas y deterioradas con el método de ondas de esfuerzo (e) y ultrasonido (u), para la viga sana 1 y deteriorada 1 (a), la viga sana 2 y deteriorada 2 (b) y para la viga sana 3 y deteriorada 3 (c), promedios de la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido (d).

En el sentido Transversal radial (T_{RS} u) y la técnica de ondas de esfuerzo en el sentido longitudinal (T_{RS} e) para el grupo de vigas sanas existe una diferencia del 61.4%, para la misma dirección del grupo de vigas deterioradas (T_{RD} u y T_{RD} e) existe una diferencia entre ellas de un 56.6% entre ambos grupos de vigas aplicando las dos técnicas existe una diferencia de 41.8%.

La diferencia que existe entre las dos técnicas en el sentido longitudinal es menor al 20% siendo esta dirección la que presenta una mejor trasmisión de las ondas debido a sus características anatómicas (Carrillo y Carreón 2019 a). La dirección Transversal radial presenta una diferencia mayor al 50% entre ambas técnicas, esto se puede deber a factores como la sensibilidad que existe entre un equipo y otro.

“La madera tienen una estructura multicapa y, por lo tanto, pueden ser dispersivos a frecuencias relativamente más altas cuando la longitud de onda es del mismo orden de magnitud que las dimensiones del cubo / grosor del anillo de crecimiento. Además, la madera tardía y la madera temprana tienen diferentes densidades y propiedades materiales, donde la densidad y las velocidades para la madera tardía son típicamente más altas que las de la madera temprana” (McGovern, 2011)

Un factor más a tomar en cuenta también al momento del análisis de los datos es la orientación de los transductores al momento de realizar las mediciones debido a las características ortotrópicas y anisotrópicas de la madera las cuales afectan de manera directa en la toma de datos, así como también el contenido de humedad y la densidad (Carrillo, Carreón y Raya 2020; Carrillo, Carreón y Raya 2021).

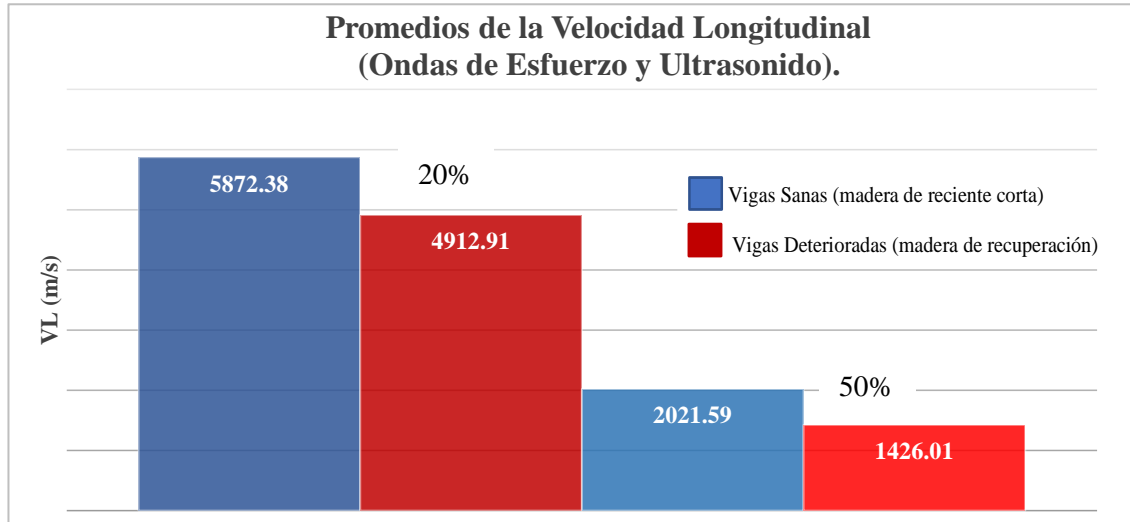


Figura 11. 71. Promedios de las mediciones de la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido con la técnica de emisión transmisión.

11.20.2. Módulo Young

El valor promedio del módulo de Young en la dirección radial y tangencial de las vigas sanas es 3% menor que el correspondiente al valor medio de las vigas deterioradas. El coeficiente de variación de las vigas sanas aumenta 51% respecto al de las vigas deterioradas. Los Módulos Young en la dirección longitudinal de las vigas sanas son 36% mayores que los de las vigas deterioradas. Igualmente, el coeficiente de variación de las vigas sanas es menor 33.5% respecto al de las deterioradas (Carrillo, Sotomayor y Raya 2019 b; Carrillo, Carreón y Raya 2021).

El módulo de Young resulta del cálculo realizado con la ecuación (1) donde la densidad y la velocidad de onda están implícitas. De tal forma, la variación de estos parámetros influye en la magnitud del Módulo Young como parámetro derivado (Yu *et al.*, 2017). De aquí, se puede proponer que la densidad de la madera y la velocidad de onda, medidas directamente en las vigas, son indicadores descriptivos del estado tecnológico de la madera.

Los promedios del Módulo de Young para los dos grupos de vigas con los dos equipos de medición empleando ondas de esfuerzo (*in situ*) y ultrasonido (laboratorio) con el tipo de onda longitudinal para las direcciones L_L y T_R , (ver figuras 11.72 y 11.73).

Promedios de Módulo de Young (Ondas de esfuerzo y Ultrasonido).

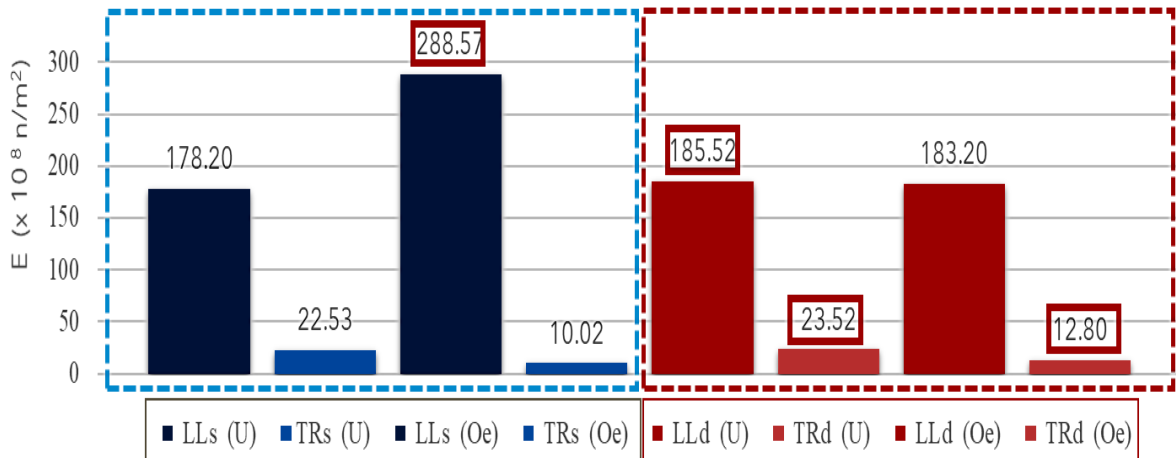


Figura 11. 72. Promedios de las mediciones del Módulo de Young empleando la velocidad longitudinal en las direcciones longitudinal (L_L), tangencial- radial (T_R) de las vigas sanas y deterioradas con el método de ondas de esfuerzo (e) y ultrasonido (u), para la viga 1 sana y 1 deteriorada (a), la viga 2 sana y 2 deterioradas (b) y para la viga 3 sana y 3 deteriorada (c), , promedios del Módulo de Young calculado con la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido (d).

En ambas técnicas de medición no destructivas empleadas para el cálculo del módulo de Young, en la cual se observó que en la técnica de ultrasonido en el sentido longitudinal (L_{LS} u) y la técnica de ondas de esfuerzo en el sentido longitudinal (L_{LS} e) para el grupo de vigas sanas existe una diferencia del 61.9%, para la misma dirección del grupo de vigas deterioradas (L_{LD} u y L_{LD} e) existe una diferencia entre ellas de un 12.4% entre ambos grupos de vigas aplicando las dos técnicas existe una diferencia de 29.7%.

En el sentido Transversal radial (T_{RS} u) y la técnica de ondas de esfuerzo en el sentido longitudinal (T_{RS} e) para el grupo de vigas sanas existe una diferencia del 55.5%, para la misma dirección del grupo de vigas deterioradas (T_{RD} u y T_{RD} e) existe una diferencia entre ellas de un 13.4% entre ambos grupos de vigas aplicando las dos técnicas existe una diferencia de 10.2%. La diferencia que existe entre las dos técnicas en el sentido longitudinal es menor al 30% siendo esta dirección la que presenta una mejor transmisión de las ondas debido a sus características anatómicas (Carrillo y Carreón 2019).

La dirección Transversal radial presenta una diferencia del 10% entre ambas técnicas esto se puede deber a factores como la sensibilidad que existe entre un equipo y otro, así como también a la orientación de los transductores al momento de realizar las mediciones debido a las características ortotrópicas y anisotrópicas de la madera (Carrillo, Sotomayor y Raya 2019 b; Carillo, Carreón y Raya 2020, Carrillo y Carreón, 2021).

La densidad de la madera se considera repartida uniformemente en la viga, y la velocidad de onda se idealiza en una sola y única dirección de la madera. Sin embargo, el Módulo Young representa un parámetro intensivo del material que es representativo y válido para una viga.

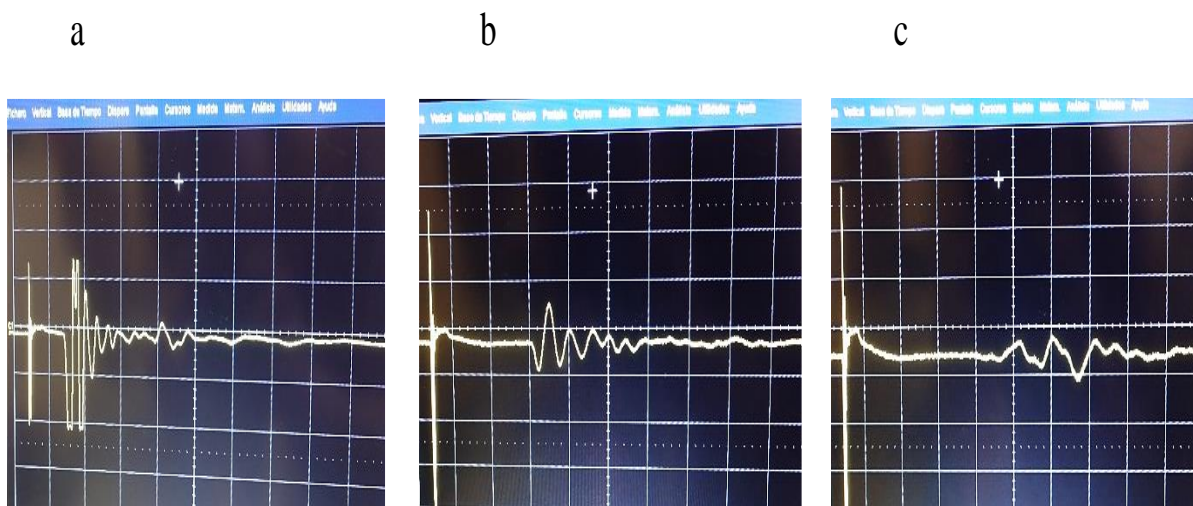


Figura 11. 73. Mediciones por medio de ultrasonido para la madera en L_L , T_T y R_R .

Las diferencias en las ondas aplicadas al material presentan diferencias y perdidas las cuales se relacionan directamente con la dirección de medición. Las imágenes siguientes son las distintas longitudes de onda ultrasónica como son captadas las señales por el Osciloscopio HP digital empleado para este análisis.

Esta peculiaridad en la metodología utilizada en este caso de estudio sugiere que, en la medida de lo posible, es necesario una cantidad suficiente de ejemplares con el fin de asegurar un tamaño de muestra estadísticamente representativa, así como también una cantidad suficiente de mediciones de las muestras de madera (Carrillo, Sotomayor y Raya 2019 b).

La señal emitida por el transductor Longitudinal: V 103 con frecuencia 1 Mhz, en el sentido longitudinal (L_L) de la muestra (ver figura 11.73 a) presenta una longitud de onda mayor a la captada en el sentido transversal (T_T)de la muestra (ver figura 11.73 b) que es menor a la longitudinal y finalmente la figura 11.73 c indica el sentido más dispersivo de las muestras de madera que es el radial (R_R).

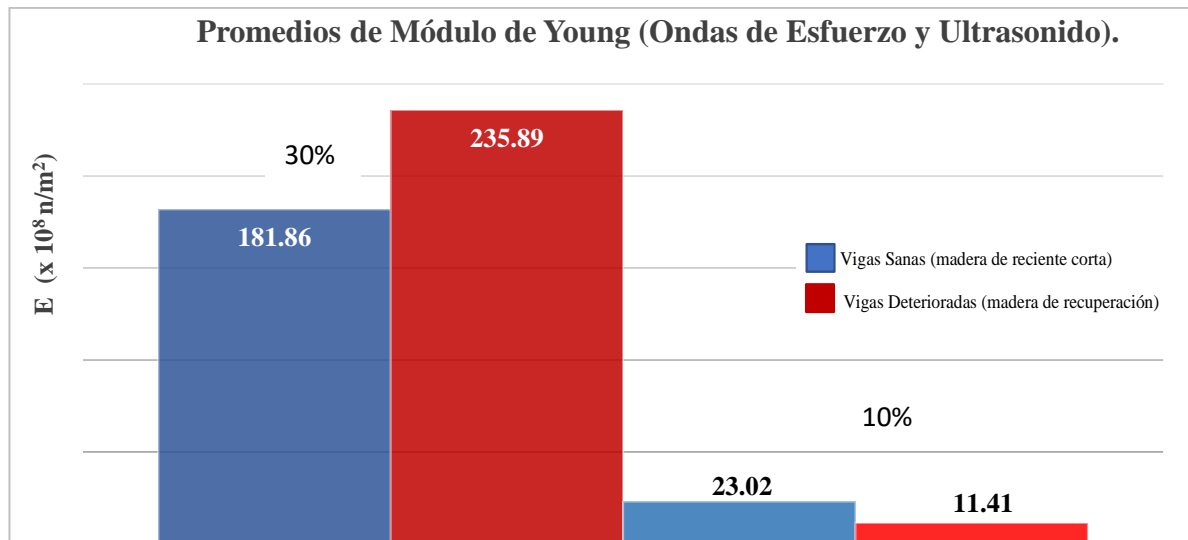


Figura 11. 74. Promedios de las mediciones del Módulo de Young con la velocidad longitudinal para ambos grupos con la técnica de ondas de esfuerzo y ultrasonido con la técnica de emisión transmisión.

La distorsión de la forma de onda es causada principalmente por la naturaleza multicapa de las muestras de madera que conduce a efectos de ondas guiadas a frecuencias más altas (madera temprana y tardía), las propiedades son muy diferentes entre sí. Se observó que la velocidad ultrasónica es mayor en la madera reciente (sana) en comparación con las muestras de madera envejecida y los cambios dependen de la orientación de los ejes de madera principales, (Carillo, Carreón y Raya 2020, Carillo y Carreón, 2021).

11.21. Resultados de las mediciones de birrefringencia para el Caso 2

Las mediciones ultrasónicas realizadas por medio de la técnica de contacto (inspección de emisión transmisión), usando dos transductores de onda de cizallamiento (V151 / 0.5 M Hz / 1.0), se dieron cuenta de que analizado el comportamiento del ultrasónica transversal de onda con respecto a las diferentes muestras de madera de reciente corta y la madera de recuperación deteriorada como se muestra en su sección transversal por SEM.

Las mediciones se tomaron en las direcciones principales de las muestras de cubos de madera, es decir, en direcciones longitudinales, radiales y tangenciales. Las velocidades medidas fueron C_{LT} , C_{LR} , C_{RL} , C_{RT} , C_{TL} y C_{TR} se calcularon alineando cuidadosamente el transductor de corte de manera que la polarización estuviera en la dirección deseada (90 grados).

La Figura 11.77 muestra los valores de velocidad de onda de corte para muestras de madera de reciente corta (sana) y madera de recuperación (deteriorada). Los datos medidos se muestran como un histograma de las distribuciones de probabilidad para la dirección longitudinal (L_T y L_R), la dirección radial (R_L y R_T) y la dirección tangencial (T_L y T_R).

Claramente se ve que la dirección longitudinal exhibe una birrefringencia de onda cortante débil y la birrefringencia más fuerte se muestra por la dirección tangencial para la cual los C_{TL} y C_{TR} están separados significativamente.

Esto puede explicarse porque las ondas de tensión inducidas en la dirección longitudinal (arriba) tienen mayor velocidad porque viajan a lo largo de las celdas orientadas verticalmente y encuentran pocos o ningún límite para impedir su progresión como se muestra en la Figura 11.77. Por otro lado, en las direcciones tangencial (inferior) y radial (media) las Ondas Transversales encuentran numerosos límites e interfaces en los elementos anatómicos como las traqueidas, los rayos, los canales resiníferos y demás elementos que componen la estructura interna de la madera los cuales reducen su velocidad de corte como se muestra en la Figura 11.77.

Las Ondas Transversales viajan sobre una porción localizada de un miembro; sus velocidades son parámetros locales y se utilizan para evaluar solo las propiedades y condiciones locales en el sitio de prueba. La distorsión de la forma de onda es causada principalmente por la naturaleza multicapa de las muestras de madera que conduce a efectos de ondas guiadas a frecuencias más altas (madera temprana y tardía), las propiedades son muy diferentes entre sí. Se observó que la velocidad ultrasónica es mayor en la madera de reciente corta (sana) en comparación con las muestras de madera de recuperación (deteriorada) y los cambios dependen de la orientación de los ejes de madera principales.

Por ejemplo, para la muestra de madera de reciente corta, el modo más rápido a través de la dirección tangencial en la birrefringencia de polarización de onda de corte T_R fue de aproximadamente 1100 m / s a 0.5 Mhz, mientras que, para las muestras de madera de recuperación, las velocidades medidas en la dirección tangencial en el corte. La polarización de onda de birrefringencia T_R fue de 900 m / s a la misma frecuencia, respectivamente.

Por otro lado, para la muestra de madera de reciente corta, el modo más rápido a través de la dirección longitudinal en la birrefringencia de polarización de onda cortante L_R fue de aproximadamente 1800 m / s a 0.5 Mhz, mientras que, para las muestras de madera de recuperación, las velocidades medidas en la dirección longitudinal en cizalla birrefringencia polarización de onda LR eran solamente 1.600 m / s en la de misma frecuencia respectivamente (Yasutoshi S., 2007).

La anisotropía elástica también se ve afectada por la presencia de características compatibles (por ejemplo, grietas, microfracturas, juntas de grano) que se presentan en las muestras de madera envejecida como se muestra en la figura 11.75.

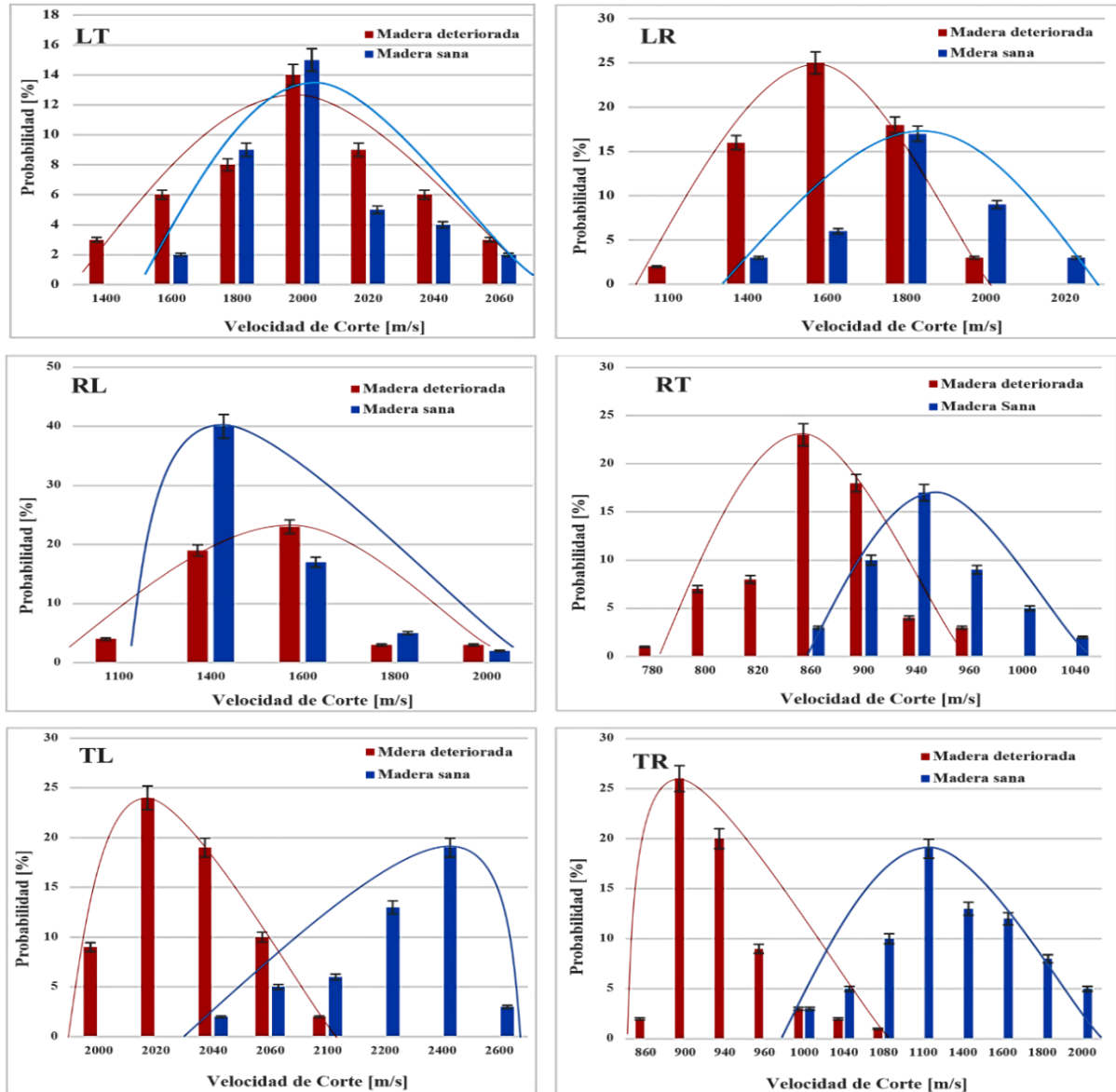


Figura 11. 75. Histograma de las distribuciones de probabilidad para la dirección longitudinal (LT y LR), la dirección radial (RL y RT) y la dirección tangencial (TL y TR) para muestras de madera de reciente corta (sana) y la madera de recuperación (deteriorada).

La anisotropía elástica de la madera se debe a su textura inducida por la organización estructural característica, que está altamente ordenada en la dirección longitudinal por disposición celular y en las direcciones radial y tangencial por la presencia de anillos anuales. La anisotropía elástica también se ve afectada por la presencia de características compatibles (por ejemplo, grietas, microfracturas, juntas de grano) que se presentan en las muestras de madera envejecida como se muestra en la figura 11.76, (Carillo, Carreón y Raya 2020; Carillo, Carreón y Raya 2021).

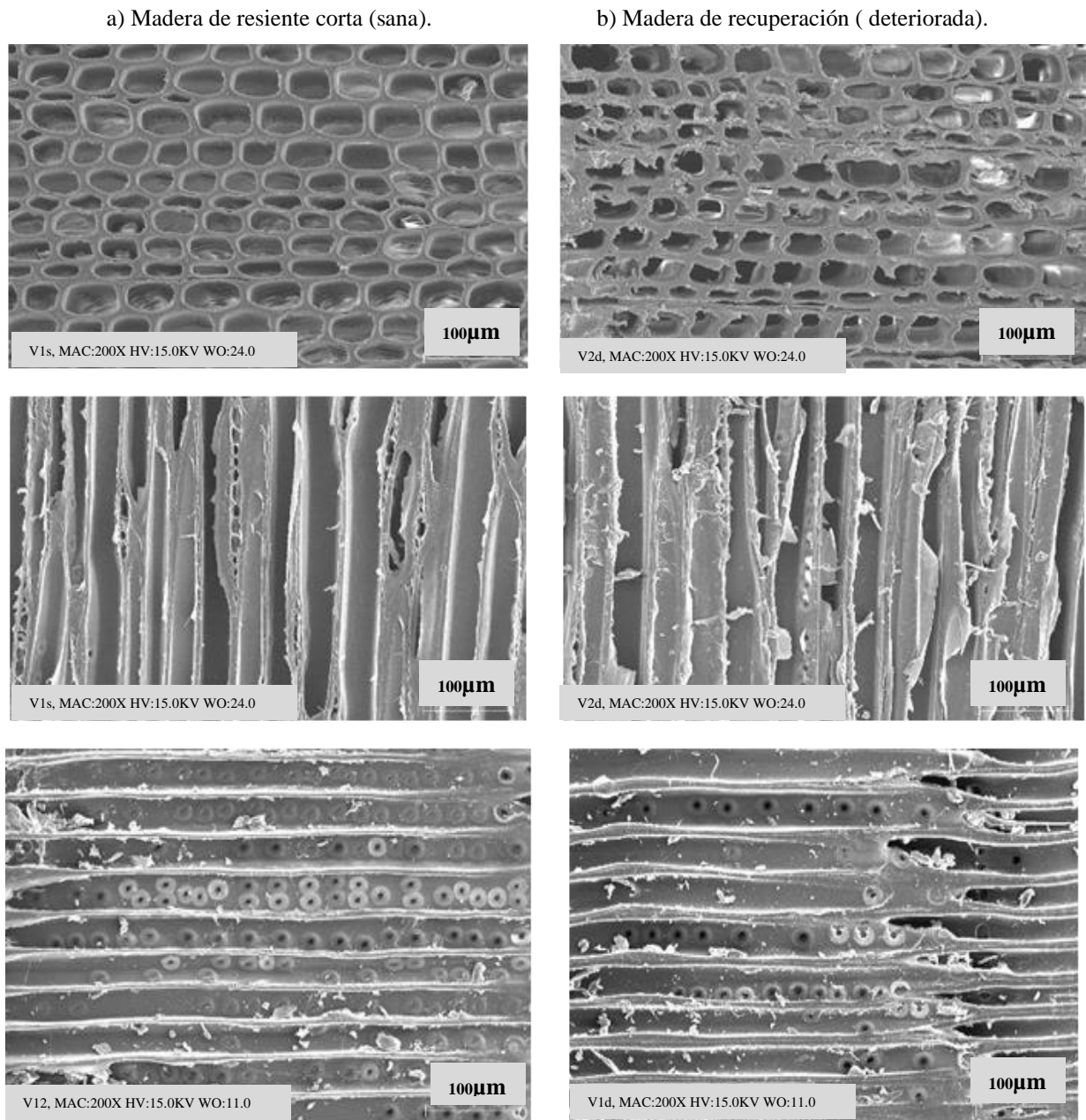


Figura 11. 76. SEM de una sección transversal de las direcciones principales Longitudinal (arriba) Radial (centro) y Tangencial (abajo) de la muestra de cubo de madera para madera de reciente corta y madera de recuperación tomada con electrones secundarios.

El grado de anisotropía por mediciones ultrasónicas que aumentan hasta un 5% en la dirección longitudinal, un 7% en la dirección radial y un 15% en la dirección tangencial en relación con la birrefringencia de la onda cortante en las dos condiciones de madera sana y madera deteriorada, respectivamente, ver figura 11.77.

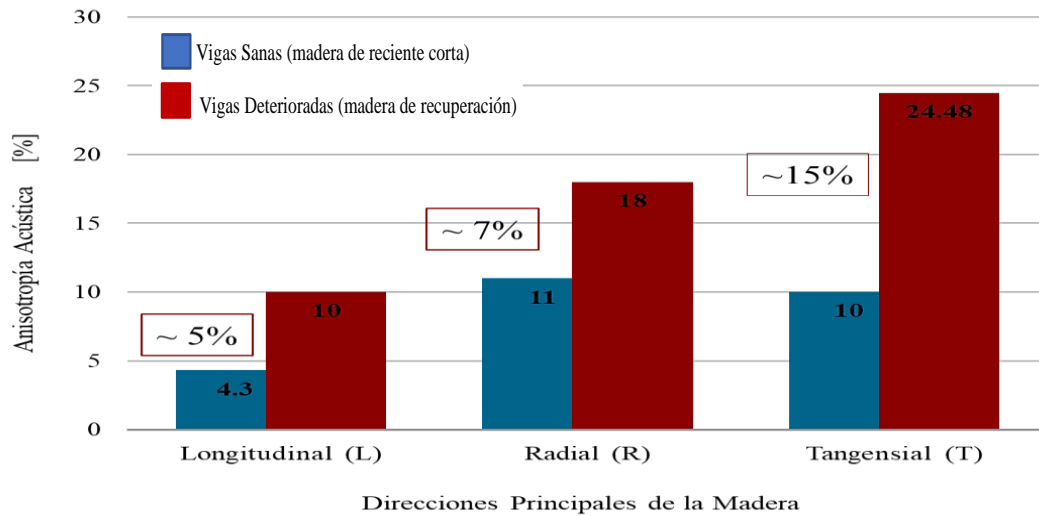


Figura 11. 77. Grado de anisotropía por mediciones ultrasónicas para muestras recientes y de madera.

11.22. Análisis anatómico del Caso 2

Las imágenes obtenidas por el microscopio electrónico de barrido confirman que en ambos grupos de madera (sana y deteriorada) fue posible distinguir las características anatómicas de las estructuras generales de madera de coníferas. Las imágenes fueron tomadas en los tres sentidos o ejes principales de la madera para los dos grupos a 200x, a una distancia de trabajo de 24 μm como lo muestran las siguientes imágenes:

11.22.1. Análisis anatómico Corte Transversal Caso 2

En el corte transversal de la madera sana es posible observar las Traqueidas longitudinales de sección circular muy marcada. Es posible ver los lúmenes de la muestra de la madera sana en su corte transversal a 200 μm , en ellas se observan como se encuentra su estructura interna, la cual está libre de deformaciones por carga y la luz de apertura de los lúmenes es limpia. ver figura 11.78.

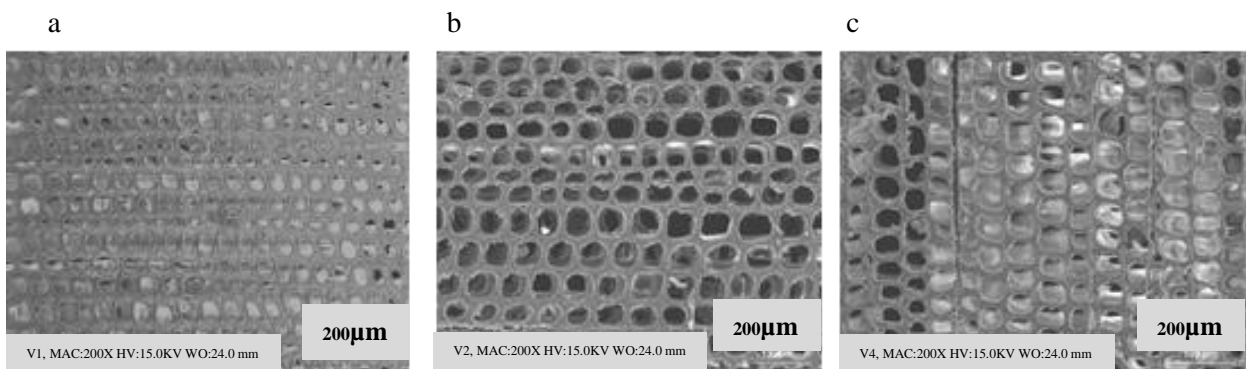


Figura 11. 78. SEM de las secciones de las muestras de las vigas sanas, corte transversal a 200 μm (a viga 1, b viga 2 y c viga 4).

Para el caso de la madera deteriorada las traqueidas ya no presentan esta forma circular las condiciones generales de las paredes celulares en la madera deteriorada. observar como las paredes celulares que conforman los lúmenes de la muestra de la madera deteriorada, presentan deformaciones por aplastamiento, fisuras y desgarres, provocados probablemente por el uso. La luz de los lúmenes se ver obstruida, no es posible tener una vista lineal del interior, su función de conducción no es buena se observar que ha sufrido una deformación (ver figura 11.79).

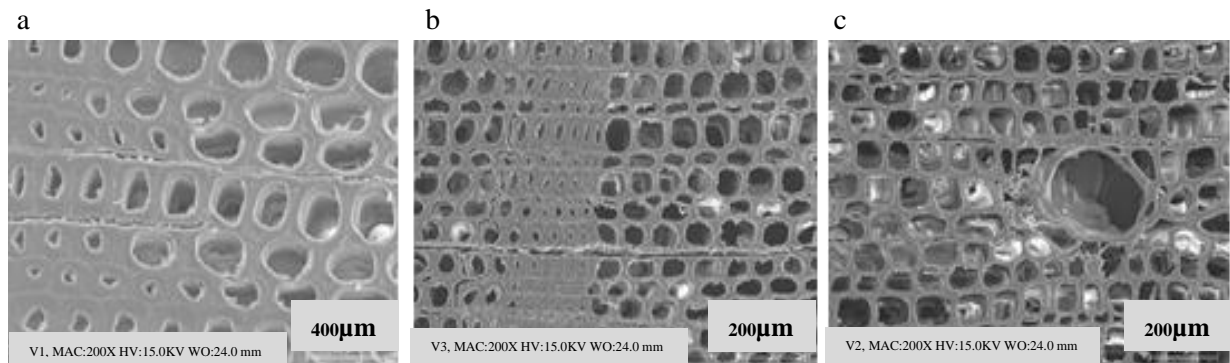


Figura 11. 79. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte transversal a 200 µm (a viga 1, a 400µm, b viga 3 a, a 200 µm y c viga 2, a 200µm).

En la figura 11.80. es posible ver los lúmenes de la muestra de la madera sana en su corte radial a 200 µm. Es notoria la diferencia entre el grupo la madera deteriorada y el grupo de la madera sana la cual está libre de deformaciones por carga y la luz de apertura de los lúmenes Al observar las traqueidas en su corte radial se puede ver que cuentan con puntuaciones aeroladas uniseriadas (ver figura 11.80 b) y en su campo de cruzamiento puntuaciones fenestriformes, (ver figura 11.80 c) características típicas de una madera de coníferas en óptimas condiciones. Se encuentra limpio (sin polvo ni hifas) características anatómicas normales de una madera de pino en óptimas condiciones.

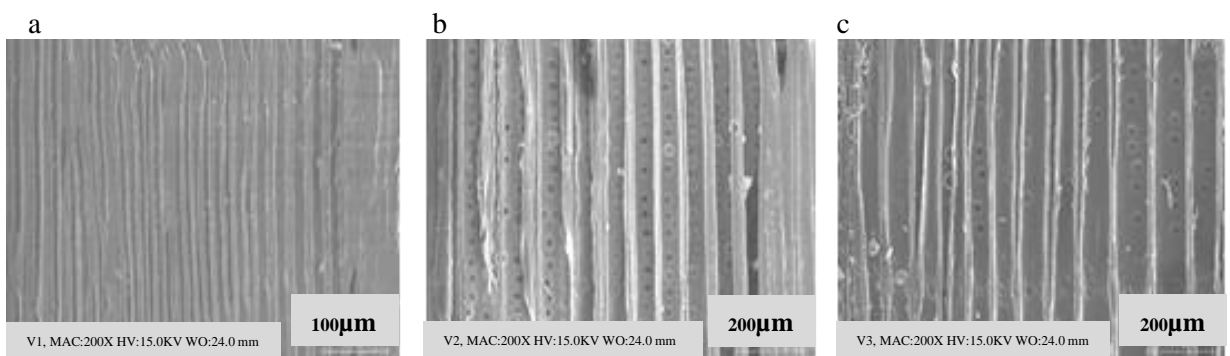


Figura 11. 80. SEM de las secciones de las muestras de las vigas de madera sana, corte radial a 200µm (a viga 1n, b viga 2 n y c viga 3n).

11.22.2. Análisis anatómico Corte Radial Caso 2.

Las muestras del grupo de la madera deteriorada en su corte radial permiten analizar las condiciones generales de las paredes celulares en la madera deteriorada, la cual presentó desgarres, fisuras y desprendimiento en las paredes celulares. Así como también presencia de hifas (hongos), en la luz correspondiente a los lúmenes. Es posible observar también como las paredes celulares presentan deformaciones por aplastamiento. En la madera deteriorada se puede observar que las capas de las paredes celulares de las traqueidas de la madera están dañadas, ver figura 11.81.

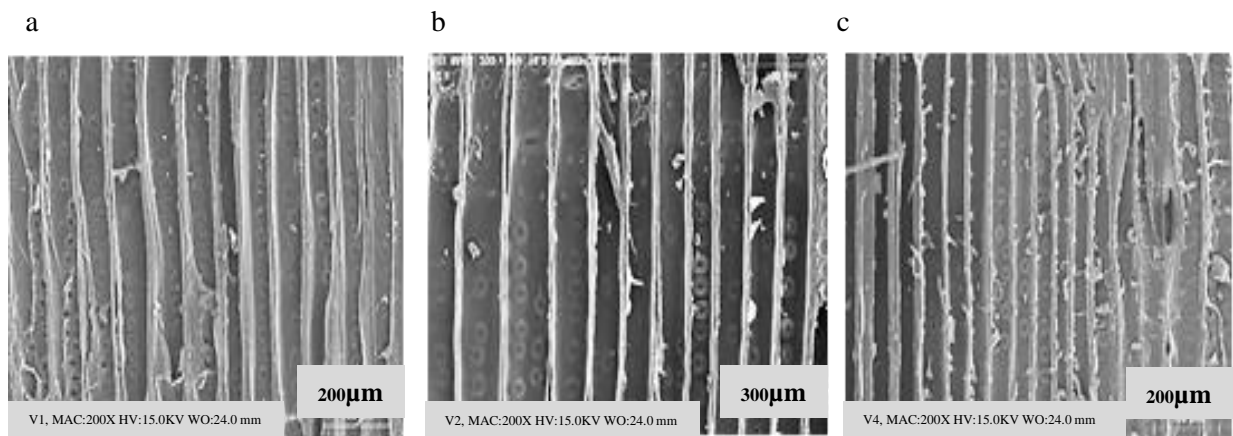


Figura 11. 81. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte radial (a viga 1 a, 200µm, b viga 2 a, 300µm y c viga 4 a, 200µm).

Al observar las traqueidas en su corte radial se puede ver como la madera sufrió aberturas en el interior de sus paredes celulares debido a los esfuerzos de carga a los que fueron sometidas, la capa de la lámina media está en muchas partes separadas entre sí, y las capas de pared celular primaria y secundarias, también presentan rupturas y desgarramientos.

Las muestras presentan punteaduras aeroladas uniseriadas (ver figuras 11.80 b y 11.80 a y c) y biseriadas (ver figura 11.80 b) sobre las paredes radiales de las traqueidas longitudinales. Las punteaduras se disponen sobre las paredes radiales de las traqueidas tanto en la madera de primavera como en la de verano, en filas de una sola serie, (donde se unen las células de traqueidas con las células parenquimáticas radiales, ver figura 11.81).

Se puede observar la trabécula (estructura forma de barra cilíndrica que atraviesa el lumen de las traqueidas de una pared tangencial a otra, ver figura 11.82 c), Traqueidas radiales alternas o diseminadas y que se sitúan alternadas entre las filas del parénquima radial, (ver figura 11.82 b). Las células de parénquima radial de los campos de cruce presentan punteaduras de tipo ventana o fenestride, (ver figura 11.82 b).

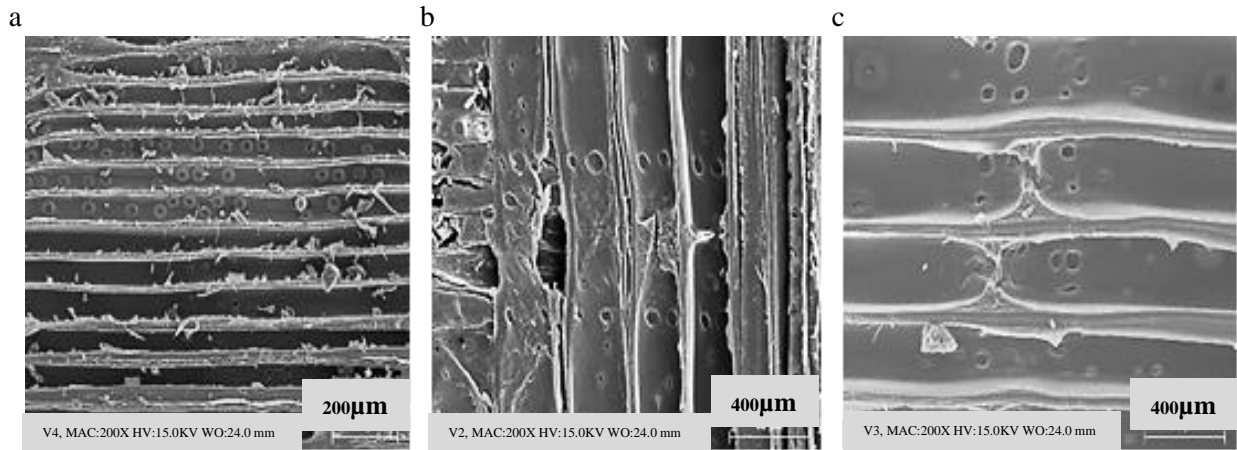


Figura 11. 82. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte radial (a viga 4, a 200μm, b viga 2, a 400μm y c viga 3 a, 400μm).

11.22.3. Análisis anatómico Corte Tangencial Caso 2.

En la madera sana en su corte tangencial a 200μm las imágenes de este grupo es notoria la diferencia entre ambos grupos. La madera sana está libre de deformaciones por carga, la luz de apertura de los lúmenes se encuentra limpio, ver figura 11.83 (sin presencia de hifas).

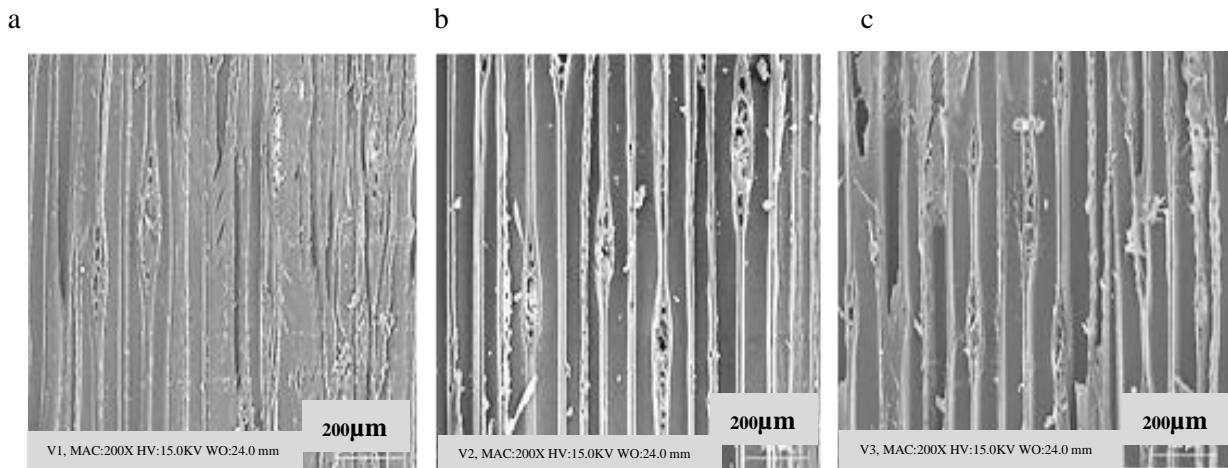


Figura 11. 83. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a 200μm, (a viga 1n, b viga 2 n y c viga 3n).

En la madera deteriorada en su corte tangencial a 200μm. La madera presenta deformaciones por carga en la pared celular, la luz de apertura de los lúmenes se encuentra bloqueado tanto por hifas como por residuos de polvo, ver figura 11.84 (sin presencia de hifas).

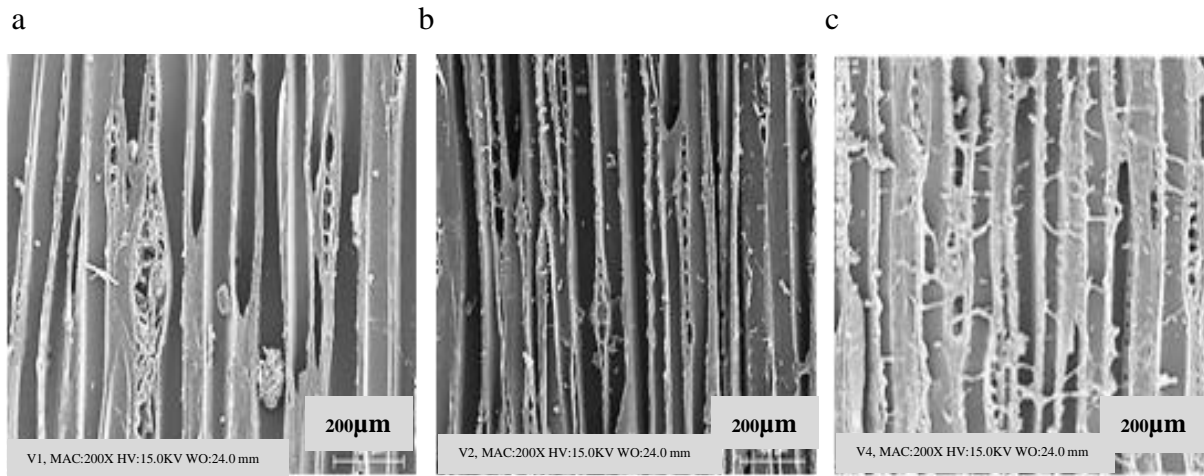


Figura 11. 84. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a 200µm, (a viga 1, b viga 2 y c viga 4).

Se encontraron radios leñosos uniseriados en varias alturas, (ver figura 11.85 b y c, y 11.83 a y b) y radios leñosos parcialmente biseriados los cuales se presentan en sus radios uniseriados y una pequeña biseriada (ver figura 11.85 c) y radios leñosos pluriseriados en los cuales se presentan canales resiníferos fisiológicos transversales, con un aspecto fusiforme con células que bordean el canal resinífero fisiológico transversal por cada lado en la parte más ancha se encuentran entre 1 y 3 (ver figura 11.85 a y b).

La capa de la lámina media está en muchas partes separadas entre sí y las capas de pared celular primaria y secundarias, también presentan rupturas y desgarramientos (ver figuras 11.85 b y c, 11.86). La luz de los lúmenes se puede ver obstruida en su interior y se observa que ha sufrido una deformación. Todas las imágenes presentan residuos de polvo y señales de haber sido alimento de termitas, al igual que presencia de hifas de hongos. (Justo José Barañaño, 2008).

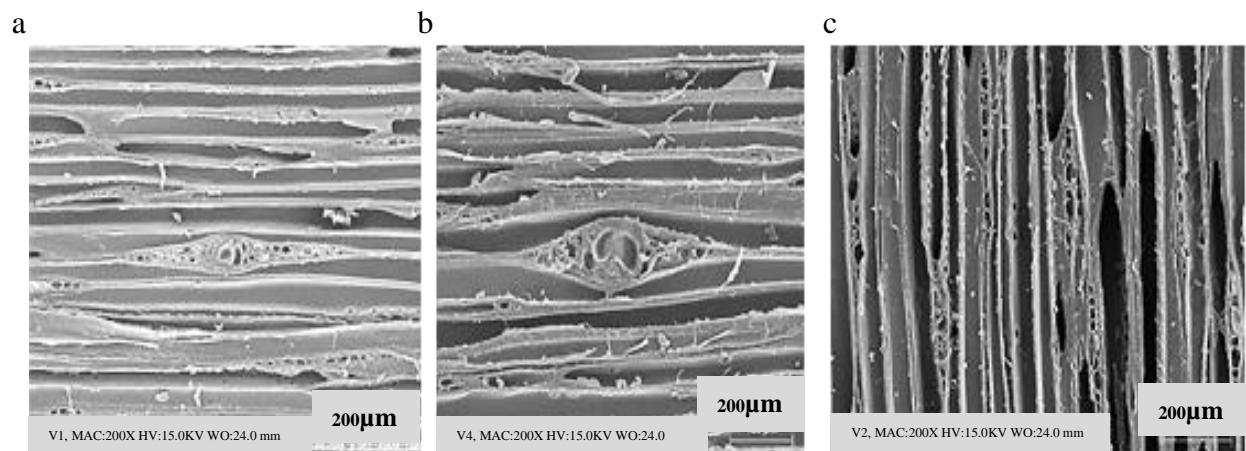


Figura 11. 85. SEM de las secciones de las muestras de las vigas, corte tangencial a 200µm, (a viga 1n, b viga 4 y c viga 2).

11.23. Resultados y Análisis para las mediciones del Contenido de Sustancias Inorgánicas (Porcentaje de Cenizas) para albura y duramen (sano y deteriorado)

Los valores presentados para el análisis químico al momento de la impresión de este documento han sido aceptados para su publicación por el Comité Editorial de la Revista *Madera y Bosques*, y notificado por el Editor Dr. Raymundo Dávalos Sotelo con el título “Los Componentes químicos de madera de pino deteriorada de tres vigas en zona de albura y duramen, pertenecientes al área de archivo del edificio de la Mitra de la ciudad de Morelia”.

Los análisis se efectuaron con material de madera de recuperación el cual se clasifico en albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd) respectivamente (ver punto 11.7).

El contenido de sustancias inorgánicas fue de (0.33 % a 0.84%), (160). La viga de madera de recuperación deteriorada 1 mostro los valores más altos de porcentajes de cenizas en tres de las cuatro zonas en las que se efectuó el muestreo As (0.48), Ds (1.36) y Dd (1.08). En la zona de albura deteriorada el valor más alto lo presento la viga 4 (0.86).

Los valores más bajos tanto en duramen sano (0.21) como deteriorado (0.49) los presentaron la viga 5. Para el caso de la albura sana en la viga 2 presentó los valores más bajos As (0.40) y para la zona de albura de la viga deteriorada 1 presentó los valores más bajos Ad (0.43).

Entre la viga 1 y la viga 2 se presentó una diferencia del 7% entre ellas para el área de As y para la Ad entre la viga 4 y la viga 4 fue de 42%. La viga 1 y la viga 5 en la zona de Ds presento una diferencia del 85% y para la zona de Dd la diferencia entre ambas vigas es de 59%. En el estudio de cinco especies de pinos mexicanos se reportó un valor de 03%, (Bernabé, *et al*, 2013), este resultado se aproxima al reportado para *P. sylvestris* (0.27%) (Balaban y Yilgör, 1995) y para *P. pringlei* (0.34%) (Ávila, 2011), mayor al encontrado en duramen (0.08%) y en albura (0.16%) en *P. pseudostrobus* (Rutiaga, 2001), y menor al rango indicado por Revilla (2011) para 5 pinos mexicanos (0.39% 0.52%), (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

Para algunas maderas europeas de pino de edad reciente se presentan valores de (0.26% a 0.30%); en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de (0.27% a 0.40%), (Kránitz, 2016; Ghavidel; 2020).

En el apartado de estadísticas se presenta los resultados del análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para el contenido de ceniza en los grupos de madera sana y

deteriorada para albura. Para la identificación de los elementos presentes en las sustancias inorgánicas se realizó su microanálisis en un espectrómetro de Rayos X, acoplado a un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM- 6400. Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 kV y 8.5 segundos, obteniéndose los espectros respectivos en puntos aleatorios. Sin embargo, los resultados se encuentran dentro del rango porcentual (0.1% a 0.8%) reportado para algunas especies de pino extranjeras (Fengel y Wegener, 1989; González, 2005; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006), ver figura 11.86.

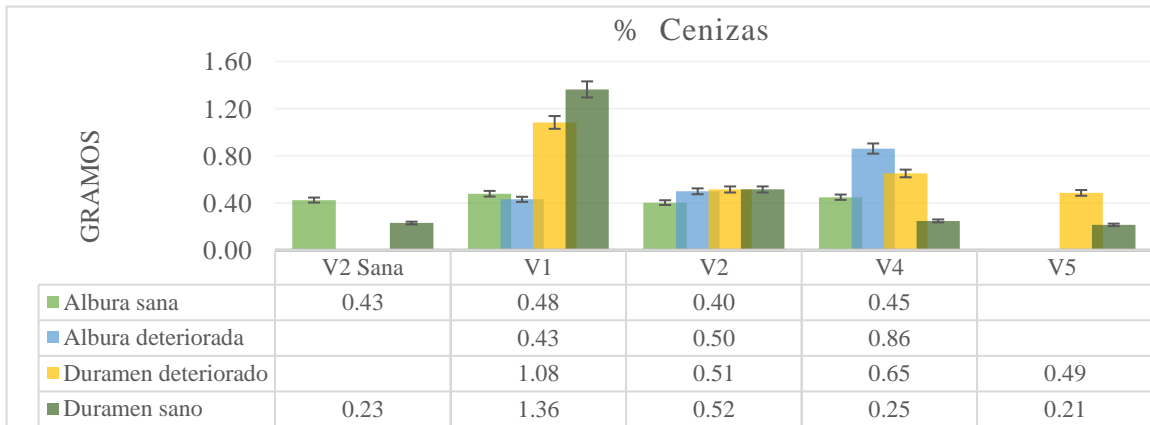


Figura 11. 86. Obtención del porcentaje de cenizas para análisis químico en albura sana, albura deteriorada, duramen sano y duramen deteriorado para las 5 muestras.

El resultado del microanálisis de las cenizas, mediante rayos X, indica que los elementos encontrados en mayor proporción son oxígeno (3.36% a 6.64%), calcio (1.80% a 3.46%), carbono (1.18% a 3.45%), potasio (0.20% a 0.84%), aluminio (0.17 % a 0.31%), silicio (0.15% a 0.59%) y magnesio (0.15% a 0.56%) ver Tabla 2; estos elementos son los principales componentes de las sustancias inorgánicas en la madera (Fengel y Wegener, 1989), también reportados en otros pinos mexicanos en ese orden de importancia (Rutiaga, 2001; Revilla, 2011) y en algunos estudios es mayor la proporción de magnesio que potasio en *P. pringlei* (Ávila, 2011).

En este estudio, el silicio sólo se encontró en la viga 1 (Ds) (0.59%) y en la viga 2 (0.15% a 0.35%), ver Tabla 11.10; algunos autores consideran que una concentración de entre 1.0% y 3.0% representa problemas para la transformación de la madera, principalmente en el desafilado de las herramientas de corte (Honorato y Hernández, 1998), siendo la rapidez de desafilado en la sierra banda en función del contenido de silicio en la madera (Kirlov, 1980). No obstante, la cantidad de este elemento químico detectada en las maderas señaladas puede considerarse de

bajo impacto en el desafilado de herramientas de corte al procesar este material, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022), (ver figura 11.87).

Tabla 11.10. Sustancias inorgánicas (en porcentaje) en albura y duramen de las vigas 1, 2 y 3.

Elemento	Viga 1				Viga 2				Viga 3			
	V1	V1	V1	V1	V2	V2	V2	V2	V3	V3	V3	V3
	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd
Carbón	1.18	1.72	3.24	2.39	1.36	1.69	0.41	3.45	3.40	1.69	1.48	2.26
Oxígeno	4.72	5.49	6.47	5.76	4.90	5.10	3.36	6.64	4.74	5.10	3.58	4.02
Magnesio	0.48	0.51	0.47	0.49	0.30	0.56	0.37	0.46	0.15	0.56	0.17	0.15
Aluminio	nd	nd	0.31	nd	0.17	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Silicio	nd	nd	0.59	nd	nd	0.15	0.31	0.18	nd	nd	nd	nd
Potasio	0.42	0.38	0.54	0.40	0.49	0.48	0.20	0.55	0.40	0.48	0.84	0.59
Calcio	3.19	3.03	2.53	3.04	2.68	3.46	3.05	2.41	2.35	3.46	1.80	2.03

nd= no detectado

La composición química básica, determinada en la mezcla de madera de albura y duramen, para las tres vigas de pino, coincide en general con datos de la literatura para maderas de pino mexicanas y extranjeras. Los contenidos de los principales componentes químicos variaron de 3.20 a 4.67 para el pH; 0.48% a 0.55% de cenizas en todas las especies, con mayor presencia de oxígeno, calcio, carbono, potasio, aluminio, silicio y magnesio, 0.25% a 1.08%, de solubilidad a la sosa; de 9.83% a 27.78), de extraíbles totales, en la extracción secuencial, la mayor solubilidad se obtuvo con acetona fue de 2.92% a 6.96%, seguido de agua caliente con 0.25% a 7.49%, en metanol fue de 2.03% a 6.22% y con ciclohexano 0.98% a 2.66%, holocelulosa de 68.22% a 84.01% y de lignina 24.19% a 31.83%, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

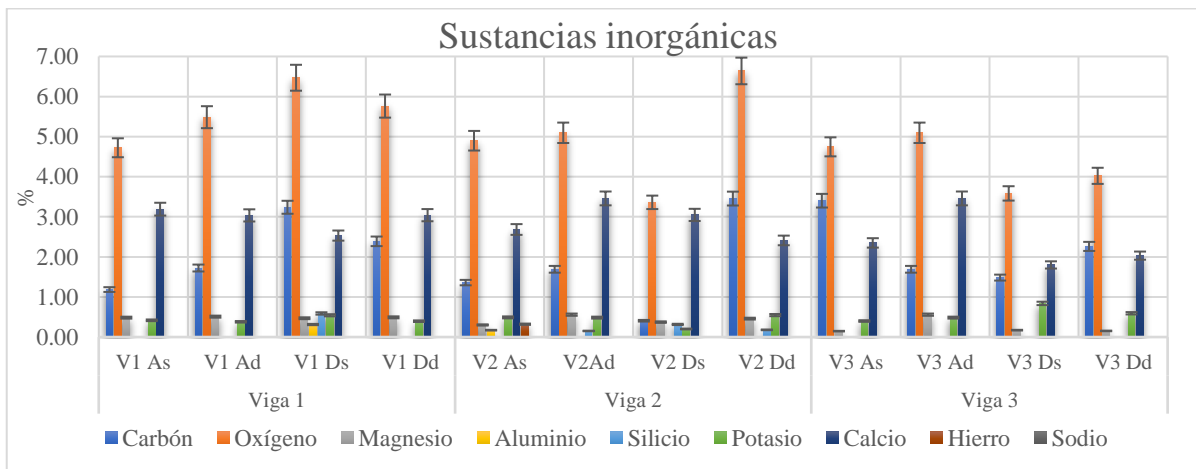


Figura 11. 87. Porcentaje de sustancias inorgánicas en madera de recuperación.

Los resultados del análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para el contenido de ceniza en los grupos de madera deteriorada para albura, se presentan en el apartado de anexos.

11.23.1 Primeros Análisis de la determinación del Contenido de Humedad para el Caso 2 para análisis químico

La viga de madera de recuperación 1 mostro los valores más altos de porcentajes de humedad tanto en las cuatro zonas en las que se efectuó el muestreo (As, Ad, Ds y Dd) y la viga de madera de recuperación 2 presentó los valores más bajos (As, Ad, Ds y Dd). La viga de madera de recuperación 5 no presento área de albura (ver figura 11.88).

Al observar la figura 11.91 se aprecia en el promedio de las mediciones del porcentaje de humedad de las cuatro vigas en sus cuatro muestras (albura sana, albura deteriorada, duramen sano y duramen deteriorado) que entre la viga 1 y la viga de madera de recuperación 2 en la zona de As existe una diferencia del 41.9%. Para la zona Ad existe una diferencia de 35.2% entre los valores de la viga de madera de recuperación 1 y la viga de madera de recuperación 2. En la zona de Dd entre el valor más alto (viga 1) y el más bajo (viga 2) es de 20.2 % y para la zona de Ds es de 34.7%, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

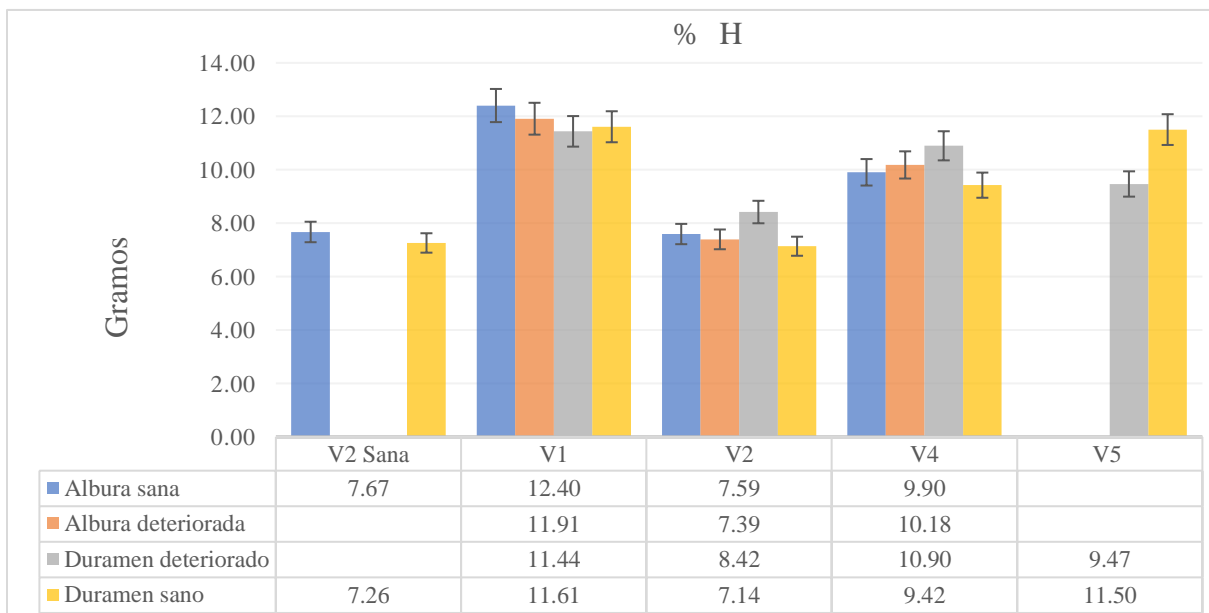


Figura 11. 88. Obtención del contenido de humedad para análisis químico en albura sana, albura deteriorada, duramen sano y duramen deteriorado para las 5 muestras.

11.23.2. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de pH para albura y duramen (sano y deteriorado)

Los valores pH obtenidos en este estudio son ligeramente ácidos (3.60 a 4.67), pero están dentro de los valores reportados para especies mexicanas ver figura 8.3.26.4. Los valores de porcentaje más altos de pH se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 1 los valores más altos (4.67) y los valores más bajos se presentaron en la viga madera de recuperación 2 (3.54), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 4 (3.90) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (3.58) (Ad). Para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 1 fue la más alta (4.14) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 3 (3.33) (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 1 (3.99) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 2 (3.20) (Dd), ver gráficas de la figura 11.89, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

El valor de pH reportado en un estudio de cinco especies mexicanas fue moderadamente ácido en los rangos de (4.0 a 4.4), (Bernabé, *et al*, 2013), en otro estudio se reportaron valores en madera de 6 pinos mexicanos: de (4.09 a 5.63) en albura y de (4.26 a 5.23, Rutiaga, 2001; Revilla, 2011) y valores aún más ácidos en pinos europeos (pH de 4.9 a 6.0) (Fengel y Wegener, 1989).

Esta variación se debe a que el grado de acidez de la madera se ve afectado por la localización en el árbol de la madera analizada, la estación, los factores climáticos, la cantidad y el tipo de extraíbles, y por la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Bernabé, *et al*, 2013).

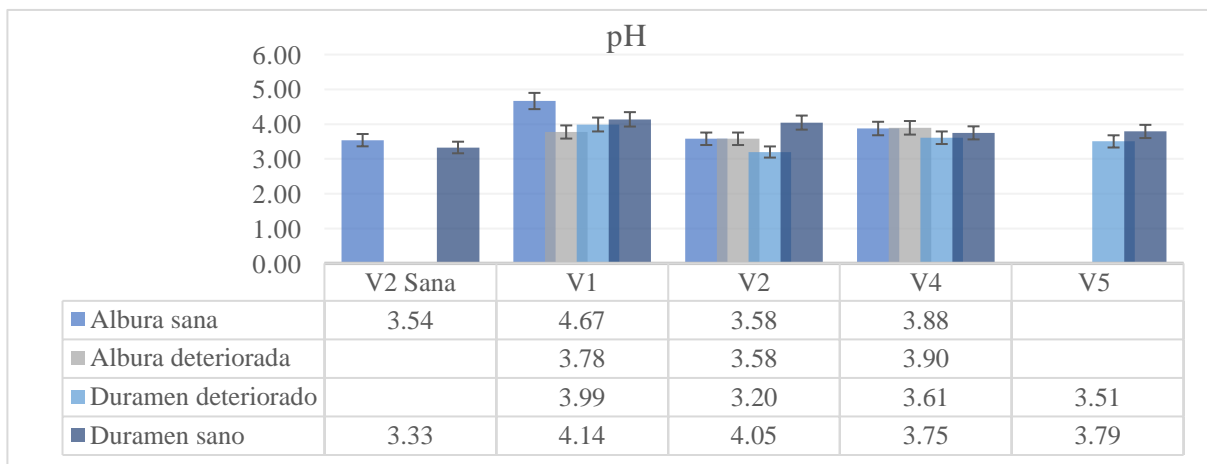


Figura 11. 89. Obtención del porcentaje de pH, para el análisis químico en albura (a) y duramen (b).

El pH moderadamente ácido en las maderas en estudio puede afectar su utilización: en contacto con metales puede corroer, también se puede ver afectada la fijación de sustancias preservantes, el fraguado de los adhesivos, (Fengel y Wegener, 1989; Poblete *et al.*, 1991; Poblete y Roffael, 2004).

11.23.3. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Solubilidad a la sosa (extraíbles solubles en sosa) para albura y duramen para el Caso 2(sano y deteriorado)

Los valores obtenidos para todas las vigas en estudio están en el rango de (23.31% a 15.82), (ver figura 11.93) y se encuentran por arriba del contenido reportado en la literatura para diferentes especies de pino de 11% a 16% (Rowell, 2005; Ávila, 2011), pero dentro del rango reportado de 17.9% a 25.4% (Bernabé, *et al*, 2013).

Los valores más altos de extraíbles solubles en sosa se presentan para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 2 (18.02%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (9.87%), (As); para el caso de albura deteriorada en las vigas 1 y 2 (22.59%). Los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (12.80%) (Ad), para la zona de duramen sano las vigas 2 (24.89%) y los valores más bajos se presentaron en la viga 5 (15.51%), (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en las vigas de madera de recuperación 1 y 2 (27.58%), los más bajos para la viga de madera de recuperación 4 (15.93%), (Dd), ver graficas de la figura 11.90, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

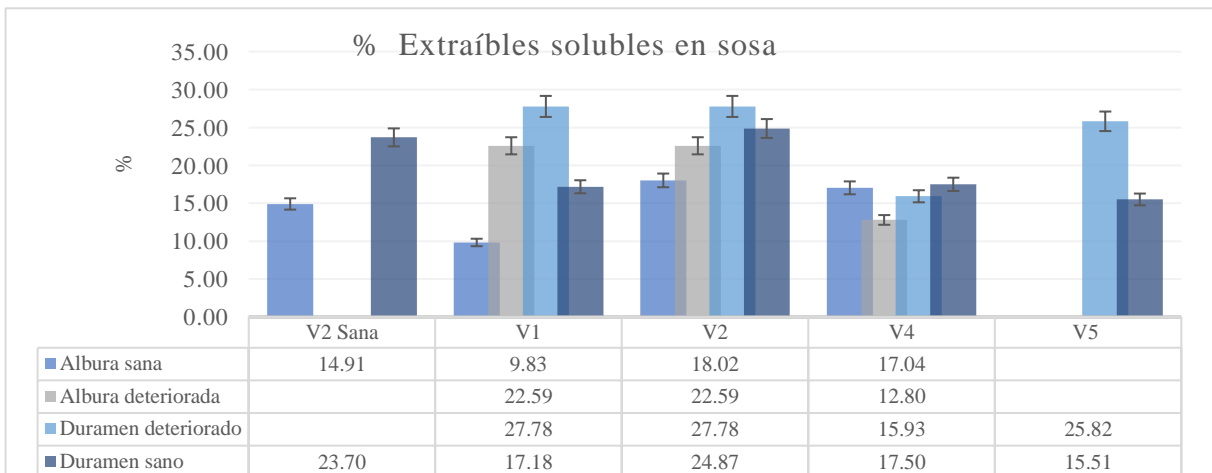


Figura 11. 90. Graficas del porcentaje de extraíbles solubles en sosa para albura y duramen, para todas las vigas.

Los extraíbles solubles en sosa pueden ser carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente hemicelulosas, los que están relacionados con el grado de pudrición por hongos o el deterioro por calor, luz u oxidación (TAPPI T 212 om-98, Bernabé, *et al*, 2013).

11.23.4. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Ciclohexano para albura y duramen (sano y deteriorado)

Los valores de porcentaje más altos de extraíbles solubles en Ciclohexano se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 2 se presentaron los valores más (1.70%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (0.98%), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 4 (1.42%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (1.20%), (Ad).

Para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 2 sana con los valores más altos (6.72%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (1.54%), (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 5 (2.60%) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 1 (1.35%), (Dd), ver graficas de la figura 11.91., (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

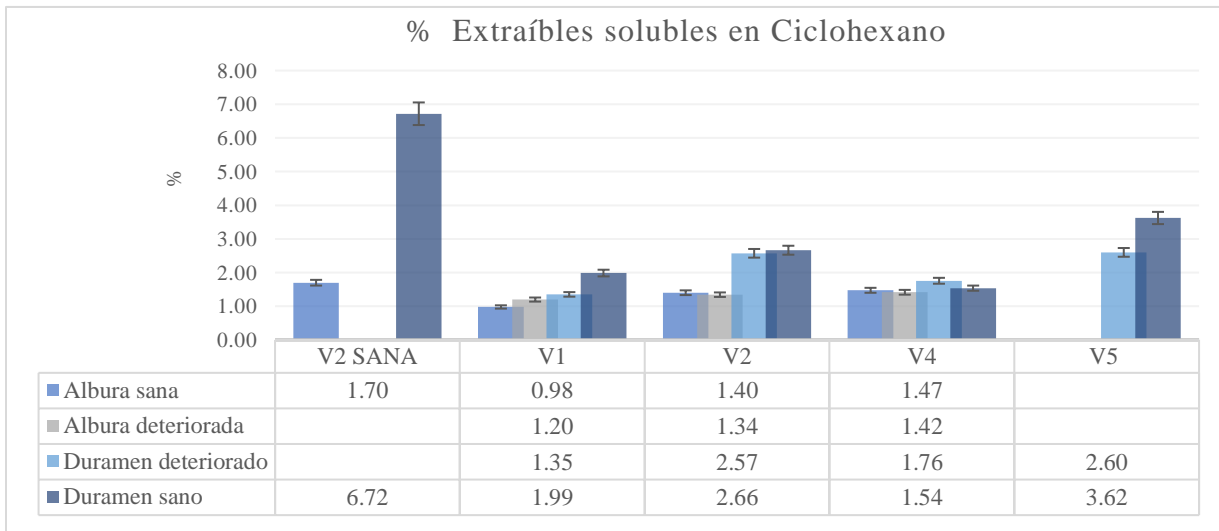


Figura 11. 91. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de ciclohexano para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).

Los resultados del análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para extraíbles solubles en Ciclohexano en los grupos de madera sana y deteriorada para albura se presentan en el apartado de anexos.

11.23.5. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Acetona para albura y duramen (sano y deteriorado)

Los valores de porcentaje más altos de extraíbles solubles en Acetona se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 2 sana los valores más altos (4.48%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (2.92%), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 4 se presentaron los valores más altos (4.07%) y los valores más bajos se presentaron en la viga 2 (3.65%), (Ad), para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 2 sana fue la más alta (12.17%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (3.45%), (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 5 (8.33%) y los más bajos para la viga 4 (3.43%), (Dd), ver graficas de la figura 11.92, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

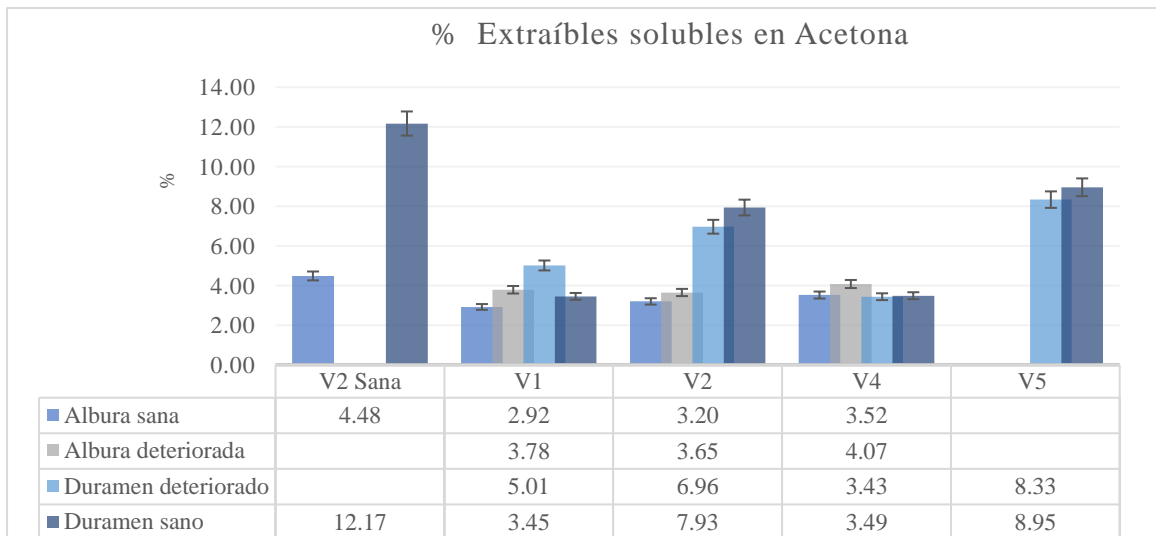


Figura 11. 92. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de acetona para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).

Se presentan los resultados del análisis estadístico en el apartado de anexos, para extraíbles solubles en Acetona en los grupos de madera sana y deteriorada para albura y duramen.

11.23.6. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Metanol para albura y duramen para el Caso 2 (sano y deteriorado).

Los valores de porcentaje más altos de extraíbles solubles en Metanol se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 1 los valores más altos (3.68%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (2.03%), (As); para el

caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 2 se presentaron los valores más altos (4.25%) y los valores más bajos se presentaron en la viga 4 (3.12%), (Ad), para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 2 sana fue la más alta (5.55%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (3.19%), (Ds), (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

Finalmente, para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 2 (6.22%) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 4 (3.37%), (Dd), ver gráfica de la figura 11.93. Los resultados del análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para extraíbles solubles en Metanol en los grupos de madera sana y deteriorada para albura, se presentan en el apartado de anexos.

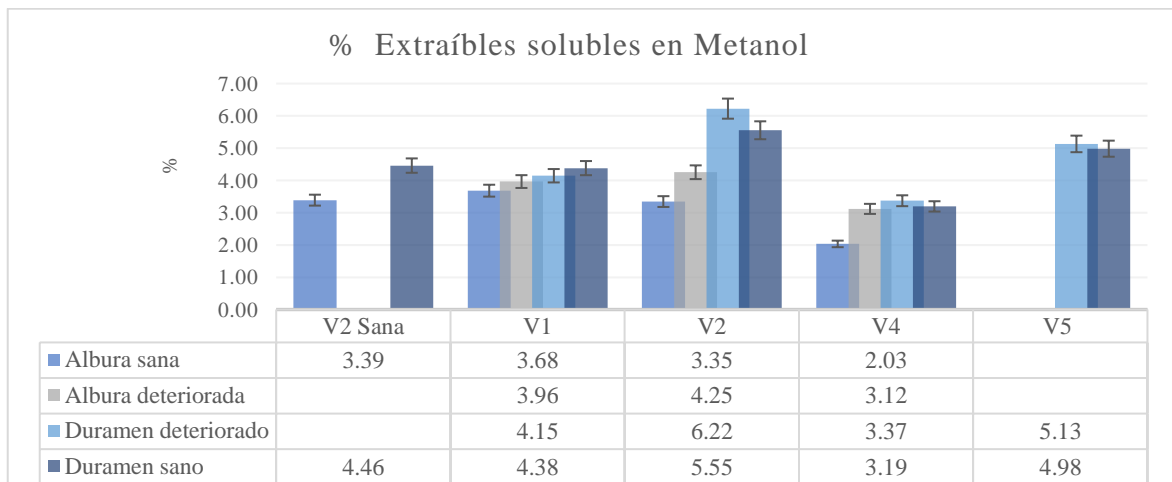


Figura 11. 93. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de metanol para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).

11.23.7. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Agua caliente para albura y duramen (sano y deteriorado)

Los valores de porcentaje más altos de extraíbles solubles en Agua caliente se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 1 sana los valores más altos (6.14%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (0.25%), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 1 se presentaron los valores más altos (7.49%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (4.14%), (Ad), para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 4 sana fue la más alta (7.26%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (0.67%), (Ds), (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

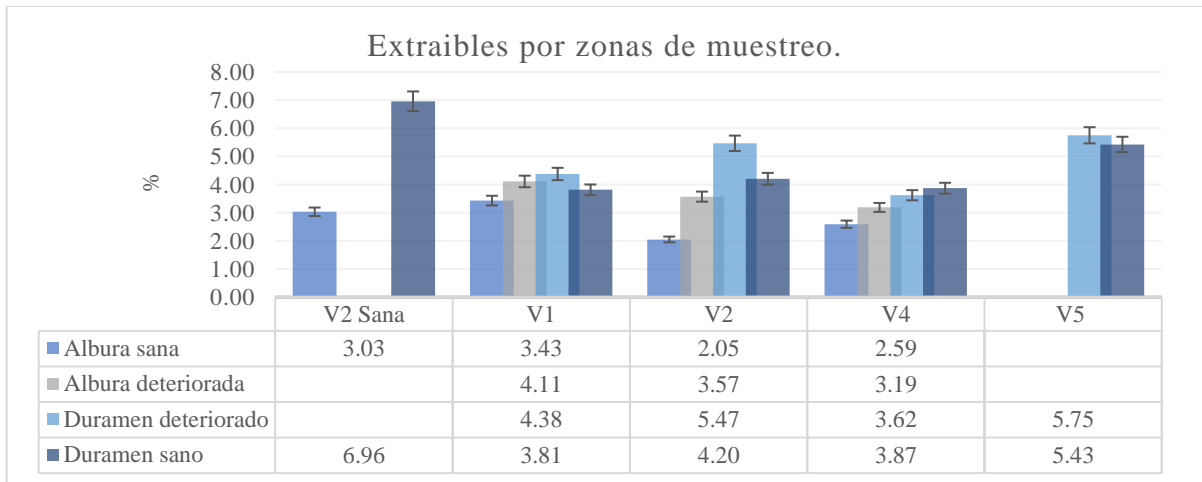


Figura 11. 94. Obtención del porcentaje de extraíbles por medio de agua caliente para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).

Finalmente, para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 1 (7.00%) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 4 (5.92%), (Dd), ver graficas de la figura 11.94. El análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para extraíbles solubles en Agua caliente en los grupos de madera sana y deteriorada para albura, se presentan en el apartado de anexos.

11.23.8. Resultados y análisis para las Sustancias extraíbles

Los mayores rendimientos se lograron con acetona y los menores con ciclohexano (85.35% a 34.32%) ver figura 11.95.

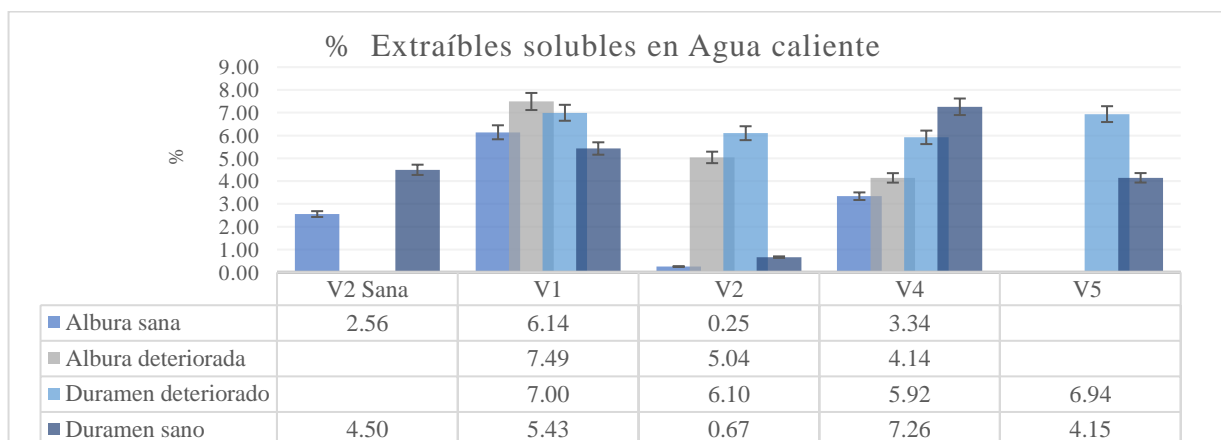


Figura 11. 95. Valores de extraíbles totales por viga empleando equipo Soxhlet (albura y duramen, sano y deteriorado).

La solubilidad de la madera alcanzados son ligeramente superiores al rango encontrado por otros autores (5.59% a 3.32%), para especies de pino (2.4% a 7.7%) (Fengel y Wegener,

1989; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006), e inferiores a los calculados en *P. oocarpa* (10.89%) (González, 2005), duramen de *P. pseudostrobus* (13.2%) (Rutiaga, 2001) y albura y duramen de *P. cembroides*, *P. maximartinezii*, *P. johannis* y *P. pinceana* (11.5% a 33.7%), es en este rango en el cual entran los resultados de este estudio (Revilla, 2011). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan (1.38%, 2.39% y 11.96%) en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de (1.34%, 2.66% y 2.95%), (Krántz, 2016; Ghavidel; 2020), ver figura 11.96 y 11.197, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

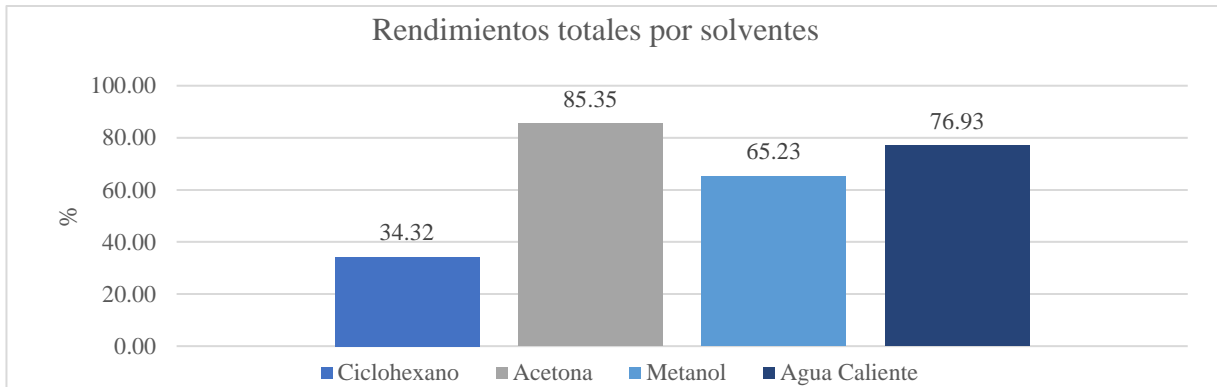


Figura 11. 96. Valores de rendimiento de los solventes empleando equipo Soxhlet para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.

La relación entre el contenido de extraíbles y las propiedades físicas y tecnológicas dependen del contenido de extraíbles, de su tipo y de su localización; por un lado, en algunas especies pueden aumentar la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica; por el otro, pueden disminuir el punto de saturación de la fibra y el contenido de humedad en equilibrio y afectar otras propiedades tecnológicas (Poblete *et al.*, 1991; Ávila y Herrera, 2012).

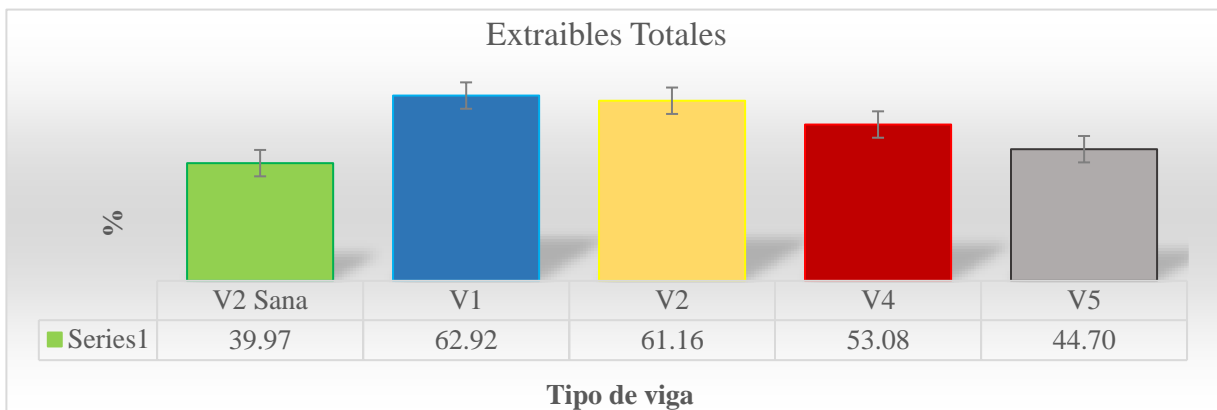


Figura 11. 97. Valores de extraíbles totales empleando equipo Soxhlet (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.

La comparación de compuestos individuales debe manejarse cuidadosamente, ya que la composición de los extractos varía mucho según el sitio de cultivo, la posición del árbol e incluso dentro del árbol. Como se informa en la literatura, el número de componentes detectables e identificables en gran medida depende del método de extracción aplicado y del programa de temperatura del análisis (Pérez-Coello *et al.* 1998; Wajs *et al.* 2006).

Es posible que los procesos de degradación sean bastante lentos en los primeros 120 años y los cambios son demasiado pequeños para ser detectados por los métodos químicos húmedos utilizados en la actualidad (Kránitz, K., *et al.*, 2016).

11.23.9. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Holocelulosa para albura y duramen (sano y deteriorado).

Los valores de porcentaje más altos de Holocelulosa se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 4 los valores más altos (84.01%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 sana (78.77%), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 4 (78.58%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (75.47%), (Ad), para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 4 es la más alta (83.25%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (69.27%), (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 4 (80.94%) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 5 (67.00%), (Dd), ver graficas de la figura 11.98, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

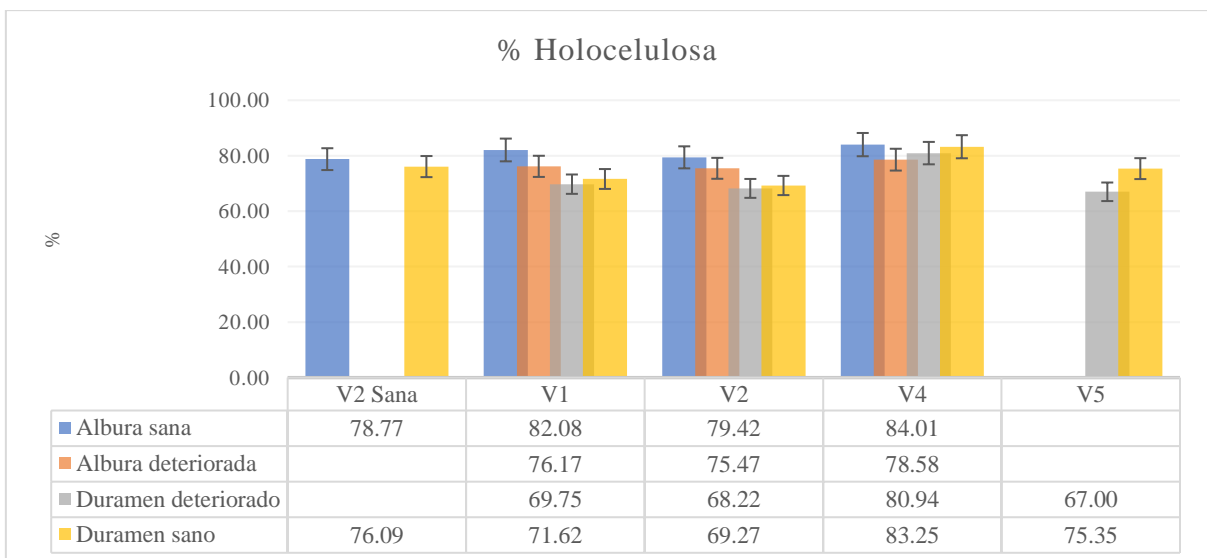


Figura 11. 98. Valores de holocelulosa (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga 2 sana y las vigas 1, 2, 4 y 5.

Se encontró en el contenido de holocelulosa un rango de (71.17% a 81.70%) en las vigas estudiadas, estos valores están dentro del rango que presentan las maderas de 120 a 150 años. Los valores determinados se encuentran en el rango reportado en la literatura para maderas de coníferas (64.0 a 82.5%) (Fengel y Wegener, 1989; Rowell, 2005). En algunos casos se han reportado resultados en pinos mexicanos con un valor relativamente bajo (68.1% a 74.7%), (Bernabé, *et al*, 2013) y de (63.6 al 68.7%) en pinos mexicanos (Rutiaga, 2001; Ávila, 2011; Revilla, 2011).

Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan (35.34%, 52.26% y 53.016%) para celulosa y de (20.98%, 29.09% y 32.31%) para hemicelulosa; en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de (49.03%, 51.83% y 56.43%) para celulosa y de para hemicelulosa (19.32%, 22.82% y 29.44%), (Kránitz, 2016; Ghavidel; 2020).

El análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para Holocelulosa en los grupos de madera sana y deteriorada para albura, se presentan en el apartado de anexos.

11.23.10. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Lignina Runkel para albura y duramen (sano y deteriorado)

El valor más alto de lignina Runkel lo presentó la viga de madera de recuperación 5 y el menor la viga de madera de recuperación 2 sana (25.59% a 31.21%) de manera general ver figura 11.102. Los valores de porcentaje más altos de contenido de lignina Runkel se observaron para el caso de albura sana en la viga de madera de recuperación 4 sana los valores más altos (31.615%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 (23.53%), (As); para el caso de albura deteriorada en la viga de madera de recuperación 1 se presentaron los valores más altos (29.02%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 4 (26.13%), (Ad).

Para la zona de duramen sano la viga de madera de recuperación 4 sana fue la más alta (27.65%) y los valores más bajos se presentaron en la viga de madera de recuperación 2 sana (29.40%), (Ds), y finalmente para la zona de duramen deteriorado los valores más altos fueron en la viga de madera de recuperación 5 (34.50%) y los más bajos para la viga de madera de recuperación 4 (30.39%), (Dd), (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan (28.14%, 29.00% y 31.62%); en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de (29.90%, 30.50% y 31.27%), (Kránitz, 2016; Ghavidel; 2020). Los valores de lignina entran en el rango de los reportados en madera de pinos michoacanos como *P. leiophylla* (28.5 %) cercano al publicado

para duramen de *P. pseudostrobus* (27.6%), (Bernabé, et al, 2013), pero ligeramente mayor al encontrado en albura de esta misma especie (26.6%) (Rutiaga, 2001).

Los contenidos de lignina de las especies en estudio se encuentran dentro del intervalo de lignina Klason publicado para maderas de pino mexicanas (23.6% a 31.2%) (Ávila, 2011; Revilla 2011) y para maderas de pino extranjeras (22.0% a 35.0%) (González, 2005; Rodríguez, 2005; Rowell, 2005; Fonseca, 2006).

Se conoce que el contenido de lignina desempeña un papel importante en el comportamiento de la madera ante los cambios dimensionales por variaciones en el contenido de humedad (Bárceñas y Dávalos, 1999); así, la baja contracción máxima (radial 1.6%, tangencial 2.0%) encontrada para la madera de *P. leiophylla* (Herrera y Bocanegra, 1996) pudiera explicarse por su alto contenido de lignina, comparada con la contracción, relativamente alta publicada para las maderas de *P. montezumae* (radial 5.0%, tangencial 6.6%), de *P. oocarpa* (radial 3.3%, tangencial 4.4%) (Herrera y Bocanegra, 1996) y para *P. michoacana* (radial 3.1%, tangencial 6.9%). Los resultados del análisis estadístico planteado por el diseño experimental, para el contenido de lignina en los grupos de madera sana y deteriorada para albura se presentan en el apartado de anexos.

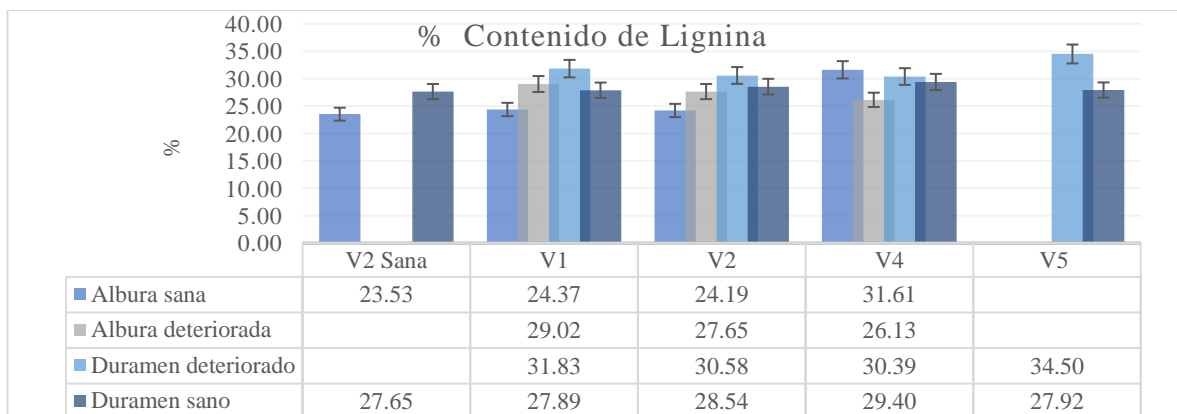


Figura 11. 99. Obtención del porcentaje de lignina para análisis químico en albura y duramen (sano y deteriorado).

11.23.11. Resumen de los valores de las mediciones de los porcentajes de Ceniza, de extraíbles empleando Equipo Soxhlet, extraíbles solubles en Sosa caustica, de Lignina Runkel y Holocelulosa

En las gráficas circulares se presentan los resultados de los porcentajes del análisis de los valores totales de Cenizas, extraíbles (empleando equipo Soxhlet), lignina y holocelulosa para cada una

de las cabezas de las vigas de madera de recuperación, viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5 (ver figuras 11.100 y 11.101.).

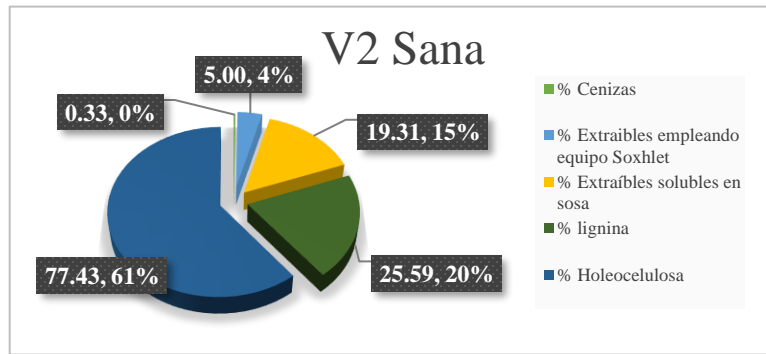


Figura 11. 100. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa para la viga 2 sana.

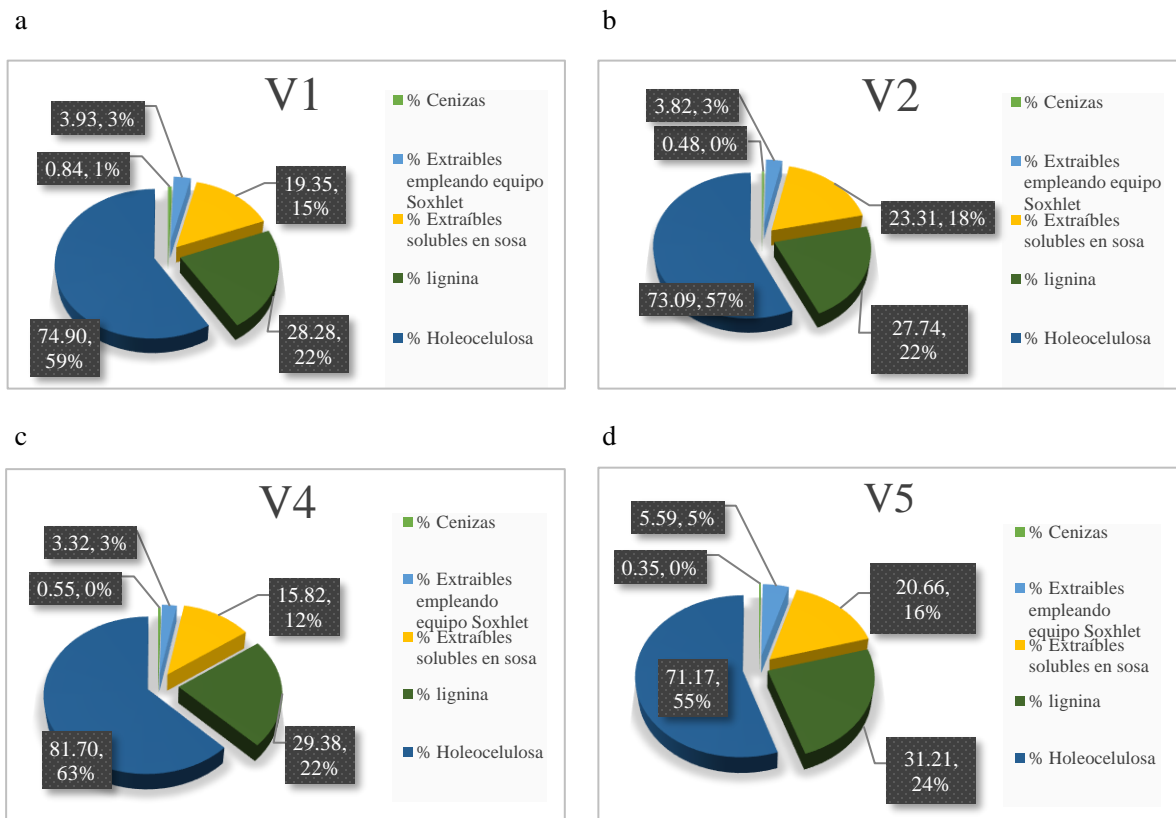


Figura 11. 101. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa para las vigas de madera de recuperación 1 (a), 2 (b), 4 (c) y 5 (d).

Los resultados de los porcentajes del análisis de los valores totales de Cenizas, extraíbles (empleando equipo Soxhlet), lignina y holocelulosa para cada una de las cabezas de las vigas de madera de recuperación, viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5 (ver figura 11.102), presentan que la viga de madera de recuperación 4

es la que presenta el valor más alto y la viga de madera de recuperación 2 la que presento los valores menores, (Carrillo, Raya y Ávila-Calderón, 2022).

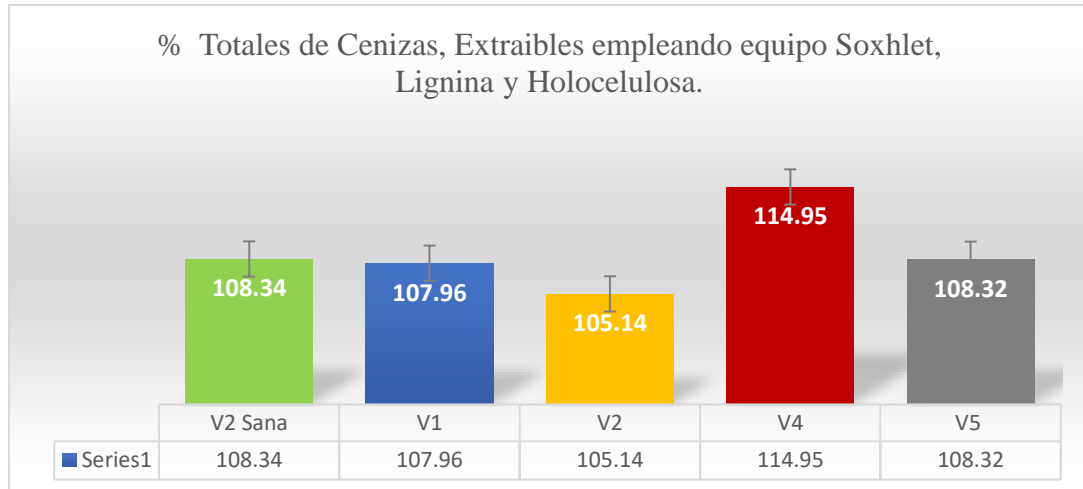


Figura 11. 102. Valores totales de Cenizas, extraíbles empleando equipo Soxhlet, lignina y holocelulosa (albura y duramen, sano y deteriorado) para la viga de madera de recuperación 2 sana y las vigas de madera de recuperación 1, 2, 4 y 5.

11.24. Conclusiones de los resultados para las pruebas de los Ensayos no Destructivos para el Caso 2

Los resultados del análisis estructural de vigas de madera por métodos no destructivos con la técnica de Ondas de Esfuerzo en trabajos de restauración de la Catedral de Morelia, México, sugieren que las características físicas y mecánicas de las vigas de madera de reciente corta son equivalentes a las de las vigas de madera de recuperación. En los análisis elaborados con el método no destructivo de ultrasonido de Emisión transmisión se observó que las velocidades aumentan con el aumento de la frecuencia y la disminuyen a medida que aumenta la cantidad de desintegración, mientras que las atenuaciones correspondientes aumentan con el aumento de la frecuencia y con la cantidad de desintegración.

En lo referente al módulo de Young también los resultados de este análisis comprueban que, durante la descomposición, hay una cantidad significativa de pérdida de masa (cuanto mayor es la exposición a la descomposición, mayor es la pérdida de masa), así como la rigidez y la pérdida de resistencia. Los resultados captados por el osciloscopio coinciden con la naturaleza multicapa de las muestras de madera, el pulso ultrasónico puede no mantener su forma original debido a la dispersión. La distorsión de forma de onda se debe principalmente a la naturaleza multicapa de las muestras de madera que conduce a efectos de onda guiada a frecuencias más

altas (las propiedades de madera temprana y tardía son muy diferentes entre sí) o al fuerte aumento de la atenuación con frecuencia y cantidad de descomposición crecientes.

El cambio en la velocidad de la onda de corte ultrasónica depende de la anisotropía de textura y la dirección estructural de la madera. El cizallamiento fenómenos birrefringencia onda tiene éxito determinada del grado de anisotropía elástica causada por la textura debido a la orientación preferencial de los elementos anatómicos (traqueidas, rayos, canales resiníferos, punteaduras, etc.) en muestras de madera sana y madera deteriorada.

Estos datos pueden correlacionarse con la condición de deterioro de la madera en función de la velocidad a la que las ondas transversales ultrasónicas se propagan a través de ellos. El uso de la velocidad de las ondas ultrasónicas que se propagan a través del material compuesto de madera se puede usar para evaluar o predecir el estado interno de la condición, especialmente durante un proceso de envejecimiento acelerado.

Los análisis estadísticos realizados para los dos tipos de muestras de madera de reciente corta (sana) y de madera de recuperación (deteriorada), empleando el aparato Fakopp (estudio en campo) y Le Croy wave Surfer 432, 350 MHz- Oscilloscope (estudio en laboratorio), ambos con la técnica de emisión transmisión; demuestran que todas las mediciones efectuadas en las distintas caras de las muestras (L_L , L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T) son distintas entre caras y entre grupos.

La estadística fortalece los resultados obtenidos en las variables de Velocidad Longitudinal, Velocidad Transversal, Módulo de Young, Módulo de Corte, Atenuación y Birrefringencia, demostrando que la dirección L_L (incluyendo sus variaciones) es en todos los casos la que cuenta con los valores más altos, es la más apropiada para la aplicación de este tipo de mediciones y que entre las direcciones T_T y R_R (incluyendo sus variaciones) no existen diferencias significativas en sus resultados, siendo estos muy semejantes.

Las ondas de tensión inducidas en la dirección longitudinal tienen mayor velocidad porque viajan a lo largo de las celdas orientadas verticalmente y encuentran pocos o ningún límite para impedir su progresión. Para poder encontrar una diferencia entre los dos materiales y sus condiciones se requiere de la aplicación del equipo de laboratorio para el cálculo de la birrefringencia del material ya que la velocidad longitudinal no permite realizar un análisis de las condiciones internas de forma volumétrica.

Se encontró que la estadística valida también los resultados de todas las mediciones de las distintas variables de ambos grupos de madera con el análisis anatómico, demostrando que la

técnica de ultrasonido es lo suficientemente sensible para detectar la estructura interna de la madera.

La estadística indicó que al efectuar mediciones en viguerías la orientación de los ejes transversal y radial (que en estos casos no siempre están bien orientados), no afectan de manera significativa a la hora de realizar los primeros diagnósticos siempre y cuando se realicen más de 10 mediciones por espécimen en estas direcciones.

11.24.1. Conclusiones Caso 2 Anisotropía

El cambio en la velocidad de la onda de corte ultrasónica depende de la anisotropía de textura y la dirección estructural de la madera. El cizallamiento fenómenos birrefringencia onda tiene éxito determinada del grado de anisotropía elástica causada por la textura debido a la orientación preferencial de los elementos anatómicos (traqueidas, rayos, canales resiníferos, punteaduras, etc.) en muestras de madera sana y madera deteriorada.

Estos datos pueden correlacionarse con la condición de deterioro de la madera en función de la velocidad a la que las ondas transversales ultrasónicas se propagan a través de ellos. El uso de la velocidad de las ondas ultrasónicas que se propagan a través del material compuesto de madera se puede usar para evaluar o predecir el estado interno de la condición, especialmente durante un proceso de envejecimiento acelerado.

11.24.2. Conclusiones Análisis Químico para el caso 2

Los valores de pH de las 4 vigas están dentro del rango de 3.6 a 4.14, lo cual indica que las muestras son ácidas. Las cenizas obtenidas varían entre 0.33% a 0.84% para todas muestras de madera. Estos valores indican que se encuentran dentro del rango de los valores reportados en la literatura. Los valores de extraíbles solubles en sosa caustica indicaron que las vigas de madera están dentro del rango de los reportados por la literatura consultada, y estos están dentro del rango de 15.82% a 23.31%

La cantidad de extractos solubles por medio de equipo Soxhlet totales determinados se encuentran entre 3.32% a 5.59%. Estos valores indican que se encuentran dentro del rango de los valores reportados en la literatura, para maderas mexicanas. De acuerdo con los solventes empleados, la mayor cantidad de extraíbles se obtuvo con Acetona, seguido de Agua caliente, de Metanol y finalmente con Ciclohexano, el cual presentó los rendimientos menores.

La presencia de lignina en las muestras de madera se encuentra en el rango de 25.59% a 31.21%. En general, los porcentajes de lignina en todos los materiales analizados están dentro de

los rangos comparándolos con los de la literatura. La madera presentó valores de holocelulosa dentro del rango de 71.17% a 81.70%.

Estos datos son consistentes con los rangos encontrados en la literatura. La madera de recuperación de la viga 4 fue la que presento los valores más altos al analizar en conjunto todos los procesos de estudio y la madera de recuperación de la viga 2 la de valores menores.

El análisis químico de todas las muestras de madera indica que las cuatro vigas estudiadas presentan valores de porcentajes de ceniza, de extraíbles, de holocelulosa y de lignina que coinciden con los valores reportados en análisis previos que indican que estas vigas tienen una antigüedad que ronda de los 100 a los 150. El pH, la solubilidad a la sosa, la holocelulosa y la lignina presentaron una variación estadística significativa ($P < 0,05$) entre zonas de albura y duramen entre las tres vigas.

El análisis químico de todas las muestras de madera indica que las vigas estudiadas presentan valores de porcentajes de ceniza, de extraíbles, de holocelulosa y de lignina que coinciden con los valores reportados en análisis previos que indican que la madera estudiada aun no presenta degradaciones importantes en su composición química que puedan ser detectadas por medio de técnicas no destructivas. Los resultados del análisis indican que estas vigas tienen una antigüedad que ronda de los 100 a los 150 años.

12. Caso 3

El caso 3 corresponde a la intervención del entre piso de la zona nombrada como cuarto azul del Edificio conocido como Palacio Federal, el cual se ubica en la Avenida Madero Oriente N. 369, en Morelia Michoacán. Se realizaron trabajos de caracterización de las condiciones de las vigas existentes utilizando el método de observación para posteriormente efectuar mediciones utilizando métodos no destructivos. (ver figura 12.1).

12.1 Antecedentes

Gracias a los oficios extendidos al Dr. Jacinto Robles Camacho Delegado del centro INAH Michoacano (Instituto Nacional de Antropología e Historia). Fue posible realizar estudios de mediciones en madera utilizando métodos no destructivos de ultrasonido. Las solicitudes antes realizadas en los oficios 29/2018, 32/2018 y 34/2018 expedidos por el Programa de Doctorado en Ciencias y Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, fue dado el consentimiento por parte de las autoridades del INAH para llevar a cabo los estudios en campo relacionados con el Programa antes mencionado sobre madera estructural en edificios históricos, con la utilización del equipo de ondas de esfuerzo.

El Palacio Federal es un edificio ecléctico afrancesado, construido en el siglo XVIII, que primero fungió como convento de las monjas Catarinas, después albergó al Colegio Teresiano de Santa María de Guadalupe en el siglo XIX. Desde 1935 es recinto de oficinas de Gobierno Federal, (ver figura 12.1).

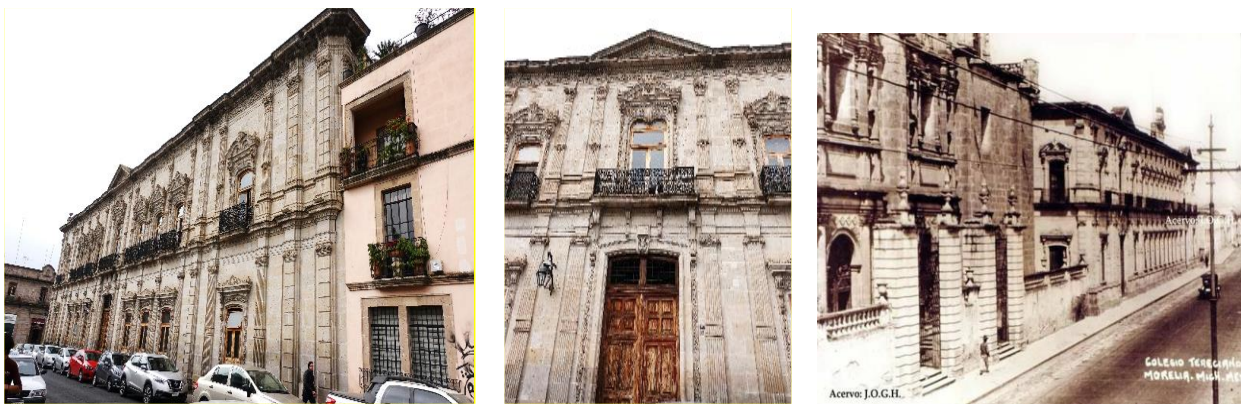


Figura 12. 1. Fachada lateral y acceso del edificio del Palacio Federal que se ubica en la Avenida Madero Oriente N. 369.

La intervención del entre piso de la zona nombrada como cuarto azul fue un proyecto de rehabilitación que no solo se limitó al cambio de vigería, sino que también a la creación de un

tapanco entre el primer piso y el entrepiso, esto con el fin de crear más espacio para el área de arqueología (ver figuras 12.2 y 12.3). Las dimensiones de este espacio son de 12.40 x 5.92 metros, esto incluye el área conocida como el cuarto azul y 5.30 x 2.55 metros en el área del pasillo de acceso adyacente.

Este nuevo espacio pretende proporcionar un lugar mejor de almacenaje del acervo con el cual se cuenta dentro del departamento de arqueología; así como brindar un área para el contacto y aproximación con las diferentes estancias educativas del estado; para despertar el interés de las nuevas generaciones en la investigación y la arqueología.

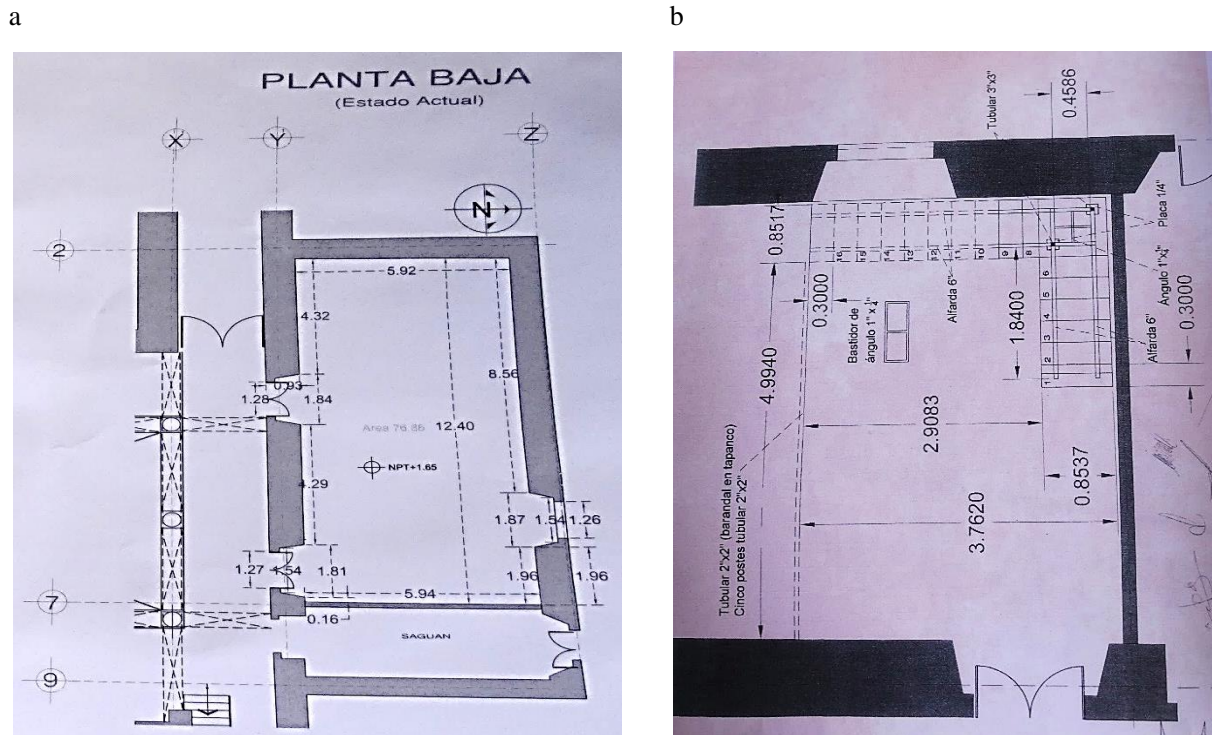


Figura 12. 2. Área de intervención del Palacio Federal, planos del área de sustitución de vigería (a) y plano de la escalera del tapanco (b).

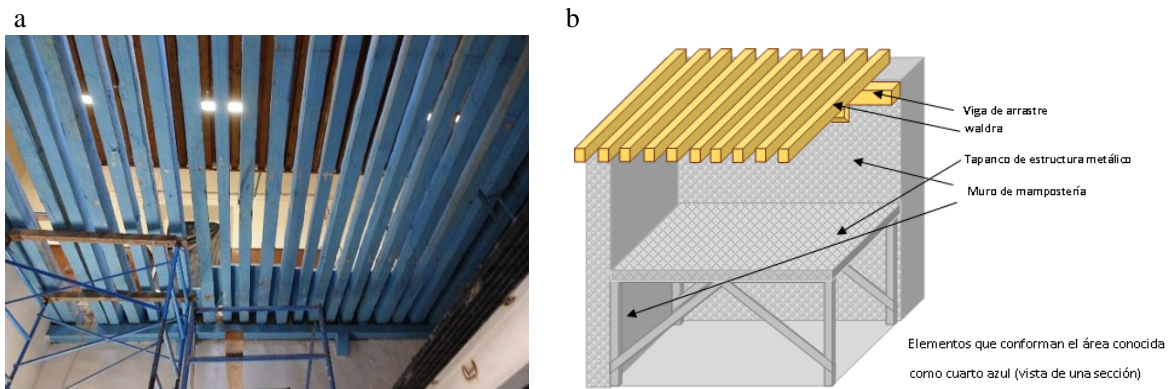


Figura 12. 3. Área de intervención del Palacio Federal, vigas en la primera etapa de los trabajos de sustitución (a), dibujo esquemático de la adecuación del área (b).

12.2. Inspección

Entre los puntos destacables de este trabajo se encuentra la aplicación de una metodología que permita evaluar edificaciones de carácter histórico, de manera científica la estrategia experimental de esta investigación es muy semejante a la empleada en los casos 1 y 2. La inspección consistió en analizar viga por viga una muestra representativa del entramado del techo (Cestari *et al.*, 2010; Branco, *et al.*, 2017).

En este estudio como en los dos anteriores, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y a la comparación de dos temporalidades de vigas de madera aserrada originaria de árboles originarios de regiones ecológicamente similares.

12.2.1 Patología de origen biológico

En la habitación se observó que había en algunas de las cabezas y a lo largo de varios elementos estructurales presencia de ataque de termitas y hongos. La presencia de estos agentes no fue el único motivo por el cual se efectuó el cambio estructural. En las imágenes siguientes se puede observar el daño que los elementos de madera presentan por causa de agentes biológicos (ver figura 12.4 a, b y c).

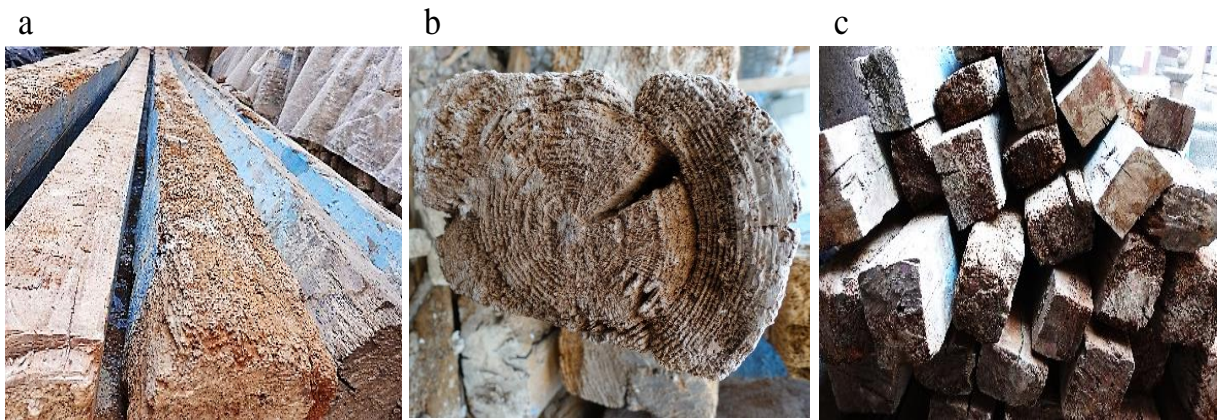


Figura 12. 4. Elementos estructurales que presentan ataque biológico pertenecientes al edificio conocido como Palacio Federal (a, b y c).

12.3. Peritaje estructural

Como ya se ha mencionado en el caso 2 de esta investigación; la estrategia de restauración de techos de madera en edificaciones históricas busca la sustitución de vigas que se encuentran en uso (las cuales presentan daños en su estructura que comprometen la seguridad) por elementos estructurales equivalentes, de madera de reciente corta de la misma especie, que cuenten con la calidad y resistencia mecánica de las vigas por sustituir (Croatto and Turrini, 2014).

Esta reconstrucción de carácter técnico exige del rigor conveniente para garantizar la seguridad del usuario y la estabilidad de la edificación, respetando los aspectos estéticos y ambientales del maderamen (Worthing y Dann, 2000). En lo que concierne al estado estructural se analizaron mediante el método visual de inspección 51 vigas de madera del género *Pinus* de reciente corta y la misma cantidad de vigas que se encontraban en servicio, pertenecientes a una habitación del edificio (ver figura 12.3).

Las que se encontraban en servicio estaban expuestas en tres de sus caras al ambiente de exterior de la habitación y 6 de ellas se ubicaban en el pasillo adjunto de la habitación conocida como cuarto azul del edificio de estilo colonial se estima que su periodo de servicio fue de al menos 100 años, según nos informan las autoridades del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Por cuestiones de seguridad del edificio por ser este parte de las oficinas en uso del instituto no fue posible contar con los planos de plantas arquitectónicas del inmueble únicamente del área de intervención en los que se observen la planta y detalles de la adecuación de esta zona del edificio.

12.4. Material medido *in situ* empleando Ondas de Esfuerzo

Se analizaron catorce vigas de madera de reciente corta y catorce vigas de madera de recuperación del género *Pinus*. El género de la madera se identificó a nivel macroscópico en el 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. Las vigas de madera de recuperación fueron seleccionadas del conjunto de 51 vigas extraídas durante los trabajos de rehabilitación del techo del entresuelo del salón conocido como cuarto azul del Edificio conocido como Palacio Federal. Las vigas de madera de reciente corta fueron adquiridas en aserraderos del estado de Michoacán, México.

En este estudio de caso como en los anteriores, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y a la comparación de dos muestras representativas de madera aserrada originaria de árboles originarios de regiones ecológicamente similares. Para simplificar el análisis, se considera mínima la influencia del Intemperismo y las condiciones de servicio, a las que estuvo expuesta la madera de recuperación. Para el grupo de vigas de madera de recuperación, se estudió el segmento de la viga que no denota deterioro severo, correspondiente al segmento de la viga expuesto en el salón que no muestra deterioro. Pero a diferencia del caso 2 en donde se eliminaron los dos segmentos empotrados en los muros; en este caso se decidió también medir las áreas de las cabezas de las vigas.

Durante la experimentación, la temperatura se mantuvo constante, así como la humedad en la madera que se estaba retirando y se observó de manera variable en la longitud de las vigas de reciente corta las cuales fueron tratadas con el método de impregnación a base de sales de boro. En el mismo contexto, con el objeto de simplificar el fenómeno y para interpretar las mediciones de la velocidad de onda, se excluyó el efecto del amortiguamiento (atenuación) de la onda mecánica y se idealizó como si viajara en una sola y única dirección.

En este caso de estudio fue posible estar presente en el proceso de inspección de las condiciones de la madera de recuperación, así como del material nuevo (madera de reciente corta) destinado a la sustitución del área antes mencionada. La totalidad de la vigería del cuarto azul fue retirada para su sustitución y colocada en el patio ubicado al frente de este como se puede observar en la figura 12.5 a, b y c, con el fin de ser clasificada según sus calidades para un uso posterior de las mismas, dividiéndolas en tres grupos según el daño que presentaban.

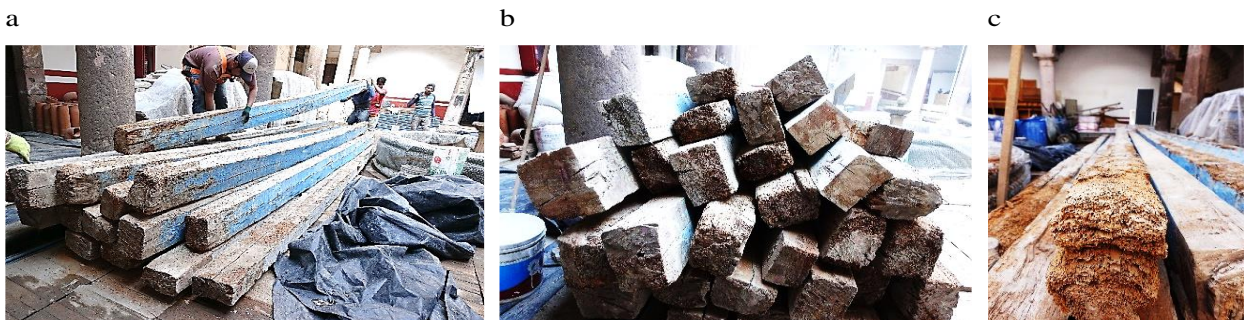


Figura 12. 5. Vigería del cuarto azul siendo retirada y colocada en el patio (a) selección del material para cortes y posible reubicación (b y c).

Las dimensiones de las vigas retiradas fueron muy variadas, esto denota a simple vista que estas corresponden a dos intervenciones distintas, unas de las vigas pertenecían a una intervención posterior a esta última y otras aparentemente sobrevivieron a otra anterior a estas dos ya mencionadas.

Los elementos de madera del cuarto azul presentaban problemas de flechado y agrietamiento como se observa en las figuras 12.4 y 12.5, no todas las cabezas se encontraban en mal estado, pero en el sentido longitudinal es posible ver las grietas producto de la carga excesiva que estas sufrieron (ver figura 12.6 b). En tanto que algunas otras sufrían de un notorio ataque biológico no solo en las cabezas (ver figura 12.6 c), sino también en otras áreas como la parte superior en el sentido longitudinal la cual estuvo en contacto.



Figura 12. 6. Vigería del cuarto azul al momento de estar siendo desmontadas del edificio (a y c) y su colocación en el patio una vez que fue retirada (c).

Estos defectos provocados a consecuencia de las cargas vivas y muertas en el área sumado al desgaste natural del material, hizo que los elementos estructurales de madera se deformaran. Desde la parte inferior era posible a simple vista detectar el daño que estas vigas presentaban. Las vigas de madera de recuperación estuvieron expuestas en tres caras al ambiente de un techo interior y se estima que su periodo de servicio fue de más de 100 años.

Debido a que estas vigas presentaban daños que ponían en riesgo la seguridad del personal fue necesario retirar la duela y el terrado que estas soportaban; tomándose la decisión de efectuar la sustitución de la totalidad de las vigas. El procedimiento es posible observarlo en las imágenes de la figura 12.7.



Figura 12. 7. Vigería del cuarto azul antes de ser retirado (a), después de retirar la duela superior (b), retiro del terrado (c), de enladrillado (d y e) y desmonte de vigas (f) del entrepiso.

Los elementos de madera de reciente corta comenzaron a monitorearse desde que estos llegaron a la planta de tratamiento y preservación de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en donde fueron tratadas con sales de boro (ver figura 12.8).

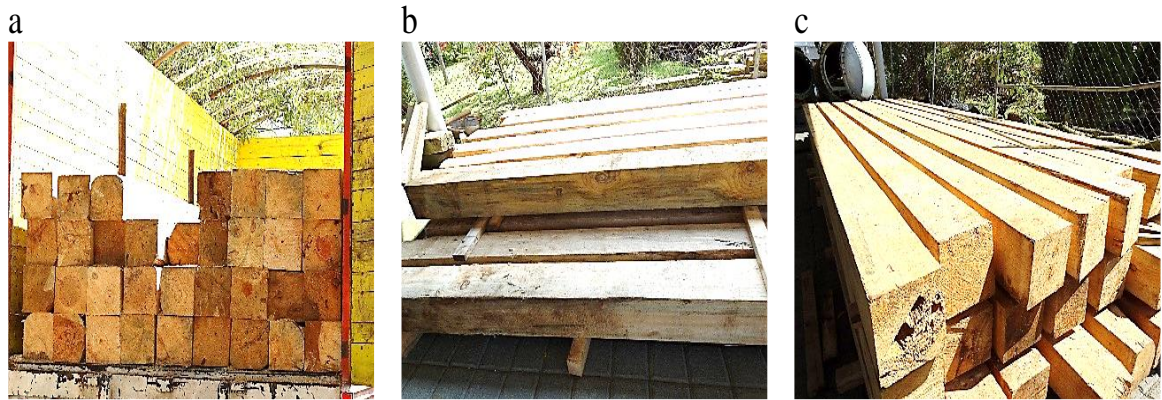


Figura 12. 8. Viguería de madera de reciente corta al momento de su llegada a para ser tratada.

Una vez normalizado el porcentaje de humedad necesario para ser tratadas estas piezas se sometieron al proceso de alto vacío (ver figura 12.9 a) con el fin de eliminar la humedad excedente en el interior y poder ser tratadas con los preservantes adecuados en contra de los ataques biológicos como hongos y termitas (ver figura 12.9).



Figura 12. 9. Viguería de madera de reciente corta antes del tratamiento de preservado (a), viguería siendo retirada del tanque de vacío posterior al tratamiento (b y c).

Debido a que se debe de considerar una medida de refuerzo en la madera para sus ajustes finales y para proporcionar una apariencia de antigua estas se sometieron a un proceso conocido como acheado o espejado posterior a su tratamiento de preservado (ver figura 12.10).



Figura 12. 10. Viguería de madera de reciente corta después del tratamiento de preservado en el proceso de espejeado (a, b y c).

Para facilitar la identificación y clasificación de los grupos de Vigas analizados por medio de Métodos no Destructivos *in situ* y en laboratorio, a partir de este apartado se nombraran como:

Madera de Recuperación del Primer Grupo clasificado *in situ*, por medio de inspección visual se le nombro como; **Madera Deteriorada**, esto debido a que el material de donación para los análisis de laboratorio pertenece a las zonas de las cabezas de las vigas las cuales presentan una mayor degradación en comparación con el resto de las vigas.

Madera de Reciente Corta se nombró **Madera Sana**, dado que estas vigas fueron cortadas y seleccionadas como madera de primera calidad libres de defectos y con un hilo alineado al corte. En lo subsecuente los subíndices R, T y L se refieren a las direcciones radial, tangencial y longitudinal con sus respectivas combinaciones dependiendo del ángulo de medición R_T , R_L , T_R , T_L , L_R y L_T , tanto para el Caso 2 como para el Caso 3.

Las dimensiones de las vigas retiradas fueron muy variadas, los promedios de las dimensiones de las piezas de madera de recuperación y de la madera de reciente corta se muestran en la Tabla 12.11.

Tabla 12.11. Dimensiones de los elementos de madera de reciente corta y madera de recuperación.

Dimensiones promedio de las vigas			
Lote de vigas	Base (cm)	Altura (cm)	Longitud (cm)
Madera sana	22.93	23.38	675.73
Madera deterioradas	24.6	23.38	603.32

12.5. Material para pruebas destructivas Caso 3

El material donado para la realización de pruebas físico-mecánicas es parte del lote de vigas de segunda calidad de madera recuperada, las cuales presentaban daños en la parte central debido a la sobre carga. En este caso de estudio fue posible obtener trazos de mayor dimensiones que en

el caso 2, dejando las cabezas de las vigas en mejores condiciones que el material del caso. Esto permitió la realización un análisis comparativo con las mediciones en campo y laboratorio. El material donado consta de 32 cabezas de 80 cm de largo, que forman parte de 30 de las vigas de madera de recuperación que fueron analizados *in situ*. En las figuras 12.11 y 11.12 se muestra el procesamiento del material donado para obtener probetas para pruebas físico-mecánicas.



Figura 12.11. Material de donación del Edificio conocido como Palacio Federal, selección y medición de vigas (a y b), corte de las secciones de donación (c y d), cabezas ya cortadas y almacenadas (e y f).



Figura 12.12. Material de donación siendo cortado para la realización de probetas (a), cortes de viga (b), selección y clasificación de probetas (c), probetas para pruebas físico-mecánicas (d).

Entre los estudios efectuados al material de donación se encuentran:

- El cálculo de la densidad para poder conocer las propiedades físico-mecánicas de esta madera y se realizó mediante el cálculo de su masa entre su volumen.
- Porcentajes en su contenido de humedad tanto en viga completa como en las zonas de las cabezas de estas (material de donación para ensayos destructivos).
- Ensayos no destructivos (obtener la velocidad de onda y el módulo de elasticidad) y ensayos destructivos (resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, para obtener el módulo de elasticidad y módulo de corte).

En lo concerniente al cierre de obra en Palacio Federal, una vez terminados los trabajos de sustracción de las vigas de madera de recuperación se procedió a la colocación de las vigas de madera de reciente corta, así como el terrado, el ladrillo y la duela nueva como se observa en las figuras 12.13 y 12.14.

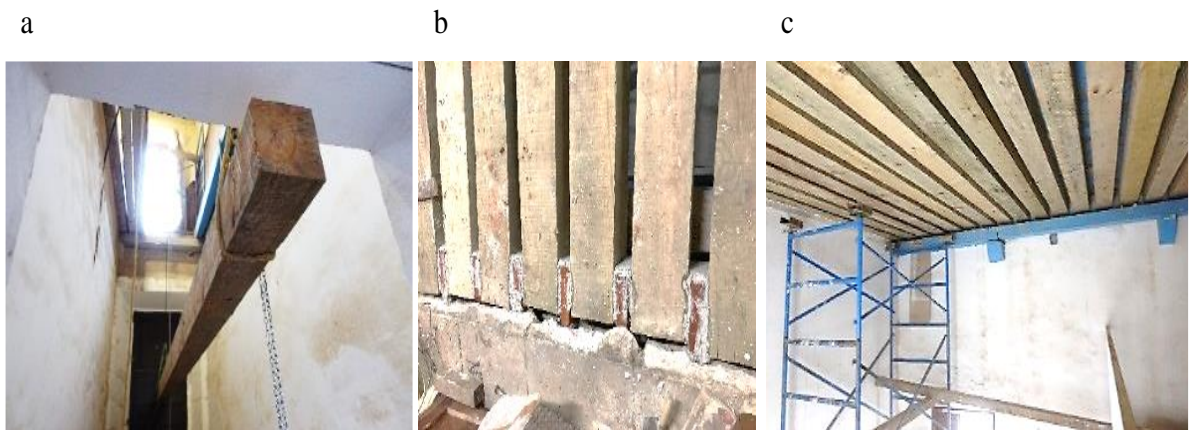


Figura 12.48. Vigería nueva siendo colocada (a, b y c).



Figura 12. 13. Vigería nueva, enladrillado (a), terrado (b) y duela ya colocados (c) en el edificio.

Una vez realizadas todas las adecuaciones necesarias no solo en la madera sino también en los muros y en la nueva estructura el resultado final se puede observar en la figura 12.15.

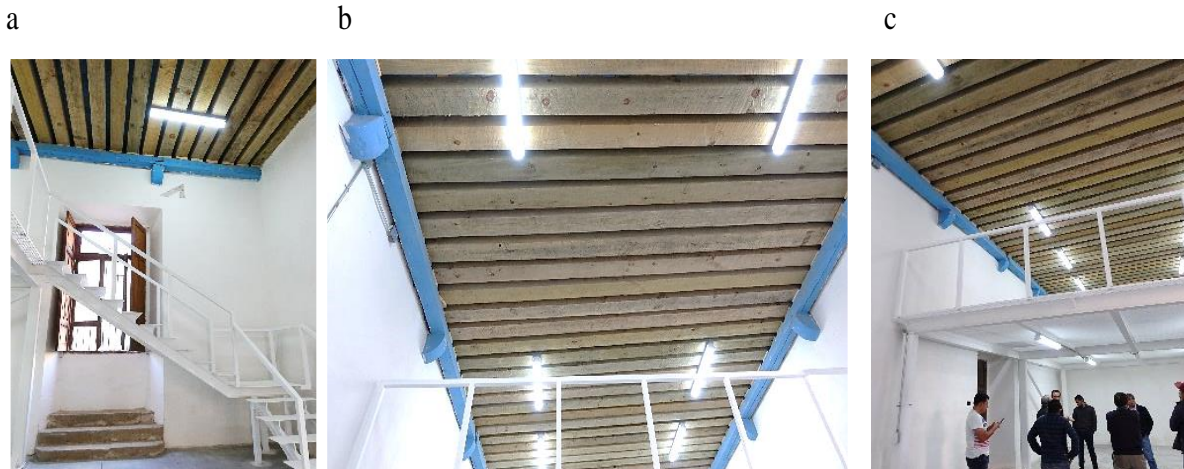


Figura 12.14. Área de intervención del Palacio Federal ya terminada (a, b y c).

12.6. Metodología de medición *in situ*

Con fines de tener un parámetro para comparar el grado de deterioro de la madera de recuperación y la madera de reciente corta que se midieron 14 vigas del total del lote conformado por 51 vigas sanas (ver figura 12.16 a) y 14 vigas deterioradas (ver figura 12.16 b), del total de las que se encontraban colocadas.

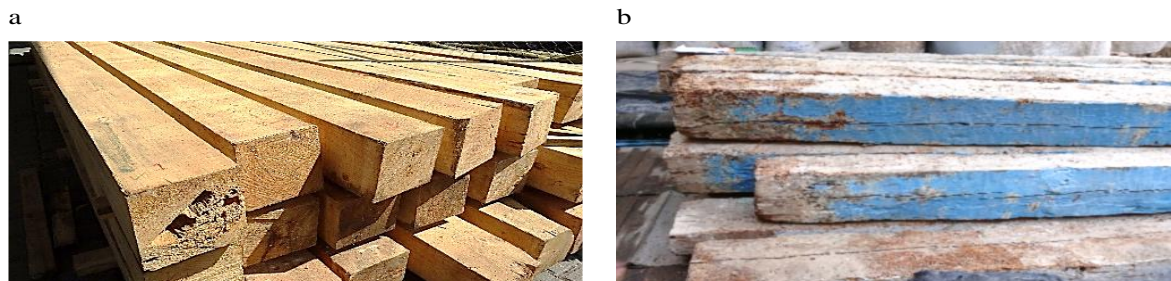


Figura 12.15. Vigería sana (a) y deteriorada (b) utilizada para las mediciones con ondas de esfuerzo.

El método de mediciones fue igual para la madera sana como para la madera deteriorada. Se colocaron los transductores emisores y receptores a los costados de la madera en forma paralela en cinco puntos diferentes en el sentido transversal radial.

En el sentido longitudinal se colocaron los transductores en cuatro puntos cubriendo la longitud total (ver figuras 12.17 y 12.18), en el sentido transversal radial se colocaron en cinco puntos a lo largo de toda la pieza (ver figura 12.17 a y b).

En las cabezas se colocaron en cuatro puntos distintos en el sentido radial transversal de la madera haciendo énfasis en el área que se encontraba empotrada en el muro, el punto de medición se tomó a la mitad de esta área (ver figura 12.17 c y d).

En lo subsecuente los subíndices R, T y L se refieren a las direcciones radial, tangencial y longitudinal. Se colocaron los receptores a los costados de manera paralela en cinco puntos diferentes y de manera transversal, en el sentido longitudinal en cuatro puntos distintos. En el sentido radial transversal de la madera se hizo énfasis en el área de las cabezas en cuatro puntos, como en las vigas nuevas ver figura 12. 18.

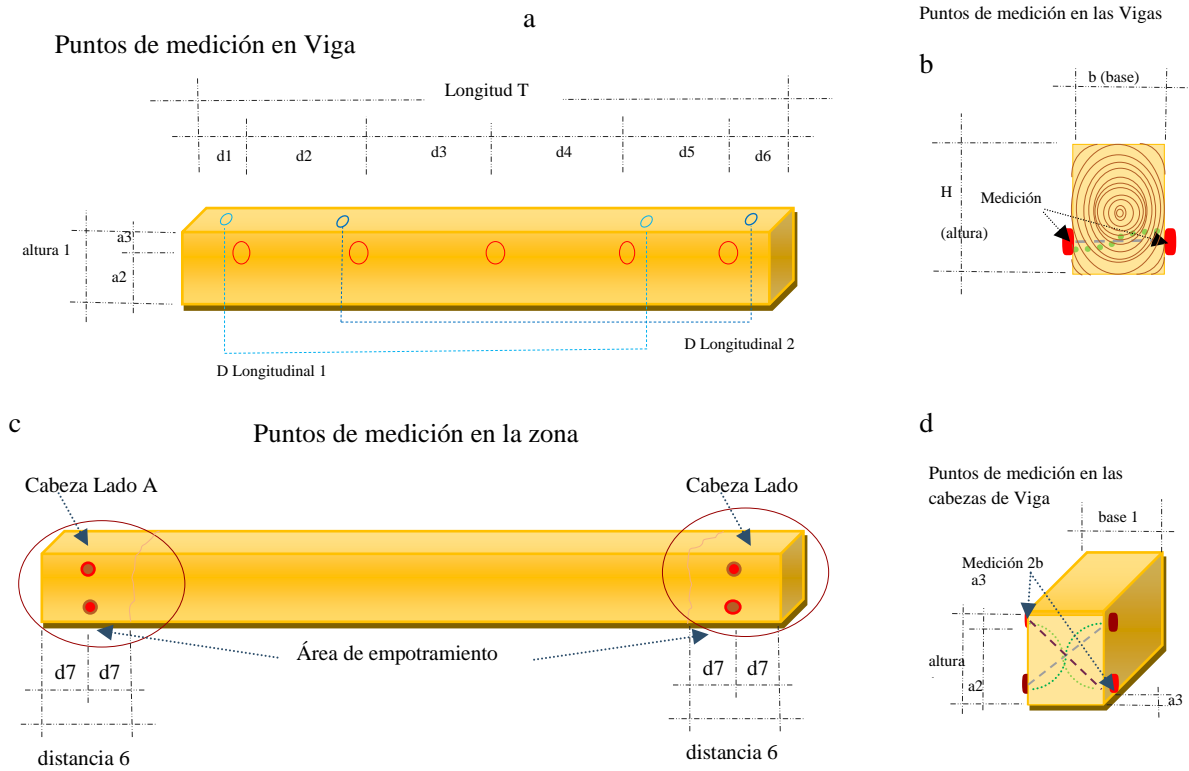


Figura 12. 16. Plan de muestreo para las mediciones del contenido de humedad y de la velocidad de onda en la vigería sana y vigería deteriorada utilizada para las mediciones con ondas de esfuerzo.

Donde: altura 1, a2 y a3 para los dos grupos de madera tienen valores diferentes, así como base 1, D longitud, Longitud Total y d1, d2, d3, d4, d5, d6 y d7, todas son medidas en centímetros



Figura 12. 17. Mediciones de la vigería sana (a, b y c) y deteriorada (d y e) con el equipo Fakopp.

12.7. Metodología de medición de la Densidad y Contenido de Humedad

El contenido de humedad de la madera, “CH”, se define como la masa de agua contenida en la madera expresada como porcentaje de la masa anhidra. La variación del contenido de humedad produce en la madera una variación de sus dimensiones.

Debido a su anisotropía, las variaciones dimensionales no serán las mismas en las direcciones axial, radial y tangencial (Kollmann, 1999).

El contenido de humedad de las vigas de madera de recuperación como de la madera de reciente corta se midió con un higrómetro eléctrico (Dietsch *et al.*, 2015), usando los mismos puntos de medición para la toma de datos por medio de ondas de esfuerzo en donde se obtuvieron las medidas de los tiempos de transmisión de onda.

El % CH de las vigas de madera de reciente corta (sanas) en promedio fue de 21.57% y de 14.79% en la madera de recuperación (deteriorada), ver figura 12.19.



Figura 12. 18. Mediciones del % de humedad en la vigería deteriorada (a) y en la vigería sana (b).

Para las muestras sometidas a los ensayos físico-mecánicos, las muestras también se midieron con un higrómetro eléctrico (Dietsch *et al.*, 2015).

El contenido de humedad de las probetas fue de 5.7%. El secado de la madera para los ensayos físico-mecánicos se hicieron siguiendo la norma ASTM D 143. Recién fabricadas las probetas, estas fueron pesadas y dispuestas para el secado final en un horno, hasta que las mismas alcanzaran un peso constante.

La densidad de la madera se define como la relación entre su masa y su volumen, y es necesario referirla a un determinado contenido de humedad, generalmente el 12 %.

Según su densidad se pueden clasificar en: muy ligera, ligera, semipesada, pesada, muy pesada. La densidad de las maderas es muy variable, de forma particular las coníferas más utilizadas en la construcción tienen una densidad comprendida entre 400 y 550 kg/m³ (Fernández, 1991).

La densidad aparente de la madera se determinó con la relación peso/volumen obtenidas de las secciones de las cabezas de las vigas que fueron donadas para esta investigación (Raposo *et al.*, 2017). La velocidad de onda se calculó con la relación distancia/tiempo de transmisión (Dackermann *et al.*, 2014; Sasaki *et al.*, 2014).

12.8. Normativa ASTM para Ensayos Sobre Propiedades Mecánicas de La Madera

El estatuto utilizado para la realización de ensayos sobre las propiedades mecánicas de la madera para el caso 3, es la norma ASTM D 143. Standar Test Methods of Small Clear Specimens of Timber (Métodos de prueba estándar para pequeños especímenes limpios de madera). La misma brinda las directrices necesarias para la fabricación de las probetas y los ensayos de estas. De igual forma, la norma ASTM D 143, es utilizada para ensayos sobre especímenes de madera en el Centro de Investigaciones de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en donde fueron efectuadas.

12.8.1. Determinación del tipo y número de ensayos

El propósito de esta investigación es determinar las propiedades mecánicas de la madera de recuperación procedente de las cabezas de las vigas estudiadas por medio de ondas de esfuerzo del Caso 3, mediante pruebas esfuerzos de compresión, corte y flexión.

El Centro de Investigaciones de Ingeniería Civil recomienda que se realice un mínimo de tres pruebas de cada espécimen, para obtener valores representativos. Los ensayos se realizaron para 32 cabezas de las 16 vigas del Caso 3 (misma especie y región). Se realizaron 3 tipos de ensayos para cada una de las cabezas de las vigas, de las cuales se obtuvieron 10 muestras de madera sanas y orientadas para cada una de las 16 viga para cada uno de los ensayos (flexión estática, compresión paralela a la fibra compresión perpendicular a la fibra). Se colocaron los transductores emisores y receptores a los costados de la madera en forma paralela en cinco puntos diferentes en el sentido transversal radial.

12.8.2. Fabricación de probetas con base a ASTM D 143

Las probetas fueron fabricadas de la madera de las cabezas de las 16 vigas, con base a la norma ASTM D 143 para los tres tipos de ensayos requeridos, esta misma norma es la empleada en el Centro de Investigaciones de Ingeniería Civil (UMSNH), las medidas de las probetas son 5.0 x 5.0 x 76 cm flexión estática, 5.0 x 5.0 x 20.0 cm compresión paralela a la fibra, 5.0 x 5.0 x 15 cm compresión perpendicular a la fibra, (ver figura 12.20). Para cada uno de los tres ensayos se fabricaron 10 piezas por cada una de las 16 vigas (480 probetas).

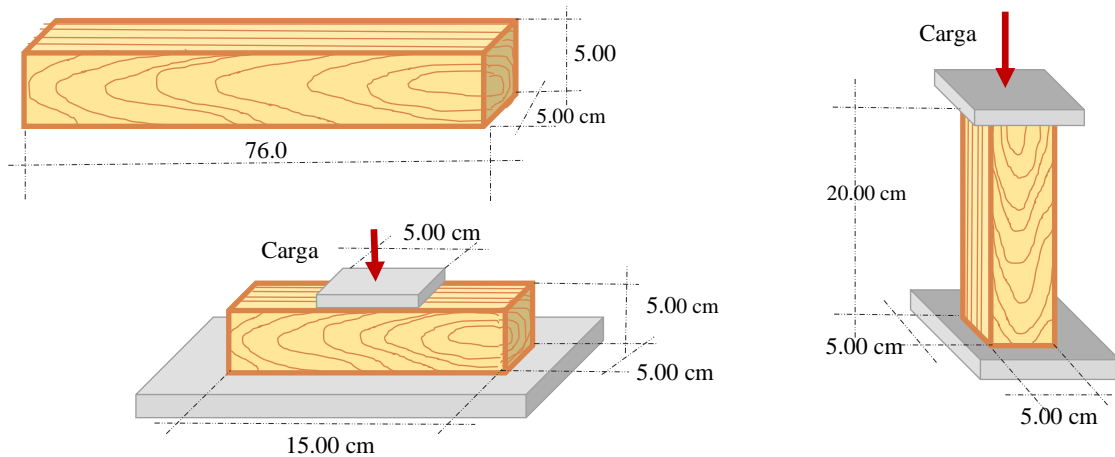


Figura 12. 19. Probetas para ensayo flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra.

12.9. Ensayo de flexión estática

La madera posee una adecuada resistencia a la flexión, especialmente por su capacidad de deformación antes de llegar a la ruptura, incluso superando su límite elástico. Esto convierte a la madera en un material flexible, comportándose con bastante ductilidad ante este tipo de solicitaciones. La presencia de nudos o deformaciones previas, tienen una gran influencia en su capacidad a flexión, reduciendo considerablemente su resistencia, y fallando generalmente en la zona donde estos se encuentran. Por su parte, el contenido de humedad no necesariamente genera disminución en su resistencia, pues las maderas húmedas suelen ser más flexibles que las maderas secas. (Martínez y Vignote, 2005; Pytel y Singer, 2008; Ambrose, 1998)

El objetivo de este ensayo es determinar el módulo de ruptura de las fibras externas, el esfuerzo cortante máximo que se presentan al fallar un espécimen de madera y determinar el tipo de falla.

Equipo

- Muestra de madera limpia de sección transversal cuadrada de 5 x 5 cm y una longitud de 76 cm.
- Máquina universal de pruebas Tinius Olsen cuchillas de carga y apoyos.
- Vernier.
- Micrómetro de caratula (compresómetro).

Procedimiento

- Se determinan las dimensiones reales de la muestra, revisando que las superficies de las caras externas sean paralelas entre sí y formen un ángulo recto con el eje longitudinal.
- Se coloca la muestra en la maquina universal de pruebas en forma horizontal.
- Se coloca en la máquina universal los apoyos con la separación centro a centro de 70 cm y la cuchilla de carga al centro de los apoyos a 35.5 cm.
- Se ajusta y se nivela la máquina, así como el micrómetro de carátula marcando cero.
- Se aplica la carga de forma lenta, por especificaciones a una velocidad constante durante todas las pruebas de tres milésimos de centímetro por cada centímetro de longitud de la probeta y por minuto (en este caso se hace con la primera velocidad de la máquina universal), hasta la falla de la muestra.
- Se toman las lecturas de la carga a cada dos milésimos de milímetro de deformación en la probeta, esto por especificaciones, (para el laboratorio se toman a cada 25 centésimos de milímetro de deformación esto debido al tipo de equipo con que se cuenta).
- Se efectúa el cálculo.

$$\text{Módulo de ruptura (kg cm}^2\text{)} = \frac{1.5 \times \text{carga máxima} \times \text{luz entre apoyos}}{\text{Ancho de probeta} \times (\text{altura probeta})^2}$$

Ecuación 29. Módulo de ruptura.

$$\text{Módulo de elasticidad (kg cm}^2\text{)} = \frac{0.25 \times (\text{luz entre apoyos})^3 \times \text{CLP}}{\text{Ancho de probeta} \times (\text{altura probeta})^3 \times \text{DLP}}$$

Ecuación 30. Módulo de elasticidad.

(Crespo *et. al*, 2008).

Donde: CLP= Carga en el límite proporcional (kg)

DLP= Deformación en el límite proporcional (cm)

El ensayo consiste en someter una barra de 5.0 x 5.0 x 76.0 cm, colocada de forma horizontal y simplemente apoyada en los extremos, a la acción de una carga puntual en el medio, con el objetivo de flexionarla y llevarla al aplastamiento de las fibras superiores y la ruptura de las fibras inferiores, ver figura 12.21.

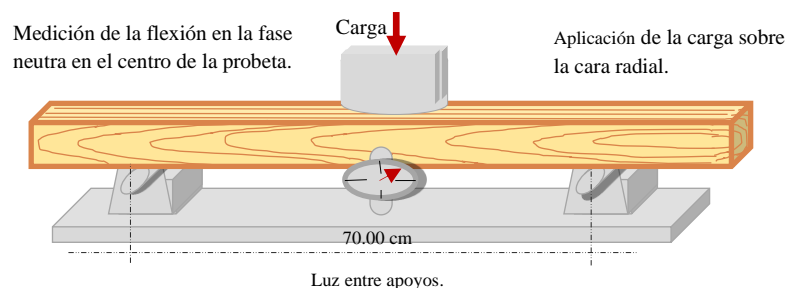


Figura 12. 20. Probeta para ensayo de flexión y accesorios utilizados.

Las fallas más comunes en este tipo de esfuerzos son fallas por flexión (aplastamiento superior y ruptura inferior), ruptura abrupta o desgarramiento. Para los ensayos del Caso 3 se presentaron fallas de tensión simple, falla de tensión en sentido contrario de las fibras (vista lateral de la muestra), falla de tensión astillada (vista inferior de la muestra), ver figura 12.22.



Figura 12. 21. Ensayos de flexión del Caso 3, falla de tensión simple (a), falla de tensión en sentido contrario de las fibras (b), falla de tensión astillada (c).

12.10. Ensayo de compresión paralelo a la fibra

El ensayo consiste en someter una probeta de medidas de 5.0 x 5.0 x 20.0 cm a la acción de una fuerza de compresión o aplastamiento en la sección transversal paralela a la fibra. Esto se realiza hasta alcanzar el acortamiento de las fibras o la ruptura lateral de la estructura tubular. A la carga que provoca la falla en la probeta se le conoce como carga última, (Pytel y Singer, 2008).

A diferencia de los ensayos de tensión o corte, el de compresión es uno de los ensayos con mayor significación práctica en lo referente a la madera, pues los resultados que brinda pueden ser utilizados directamente en funciones estructurales. Generalmente pueden identificarse fallas por aplastamiento, agrietamiento uniforme, corte, rajadura o la combinación de corte y rajadura, (Martínez y Vignote, 2005; Askeland, 2016).

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia o esfuerzo máximo a la compresión de una madera, así como su límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad.

Equipo

- Muestra de madera limpia de sección transversal cuadrada de 5 x 5cm y una longitud de 20 cm.
- Máquina universal de pruebas Tinius Olsen.
- Vernier.
- Micrómetro de caratula (compresómetro). 8.4.

Procedimiento

- Se determinan las dimensiones reales de la muestra, revisando que las superficies de las caras externas sean paralelas entre sí y formen un ángulo recto con el eje longitudinal.

- Se coloca la muestra en la maquina universal de pruebas en forma vertical.
- Se ajusta y se nivela la máquina, así como el micrómetro de carátula marcando cero.
- Se aplica la carga de forma lenta, por especificaciones a una velocidad constante durante todas las pruebas de tres milésimos de centímetro por cada centímetro de longitud de la probeta y por minuto (en este caso se hace con la primera velocidad de la máquina universal), hasta la falla de la muestra.
- Se toman las lecturas de la carga a cada dos milésimos de milímetro de deformación en la probeta, esto por especificaciones, (para el laboratorio se toman a cada 25 centésimos de milímetro de deformación esto debido al tipo de equipo con que se cuenta).
- Se efectúa el cálculo.

$$\text{Módulo de ruptura (kg cm}^2\text{)} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Ancho de probeta x espesor de probeta}} \quad \text{Ecuación 31. Compresión paralela a la fibra. (Crespo et. al, 2008).}$$

La clasificación del tipo de falla por compresión se basa de acuerdo con la apariencia que presentan las muestras después de la prueba, que pueden ser paralela a la fibra, falla de tipo cuña penetrante, aplastamiento, cortante, rajadura, compresión y cortante paralela a la fibra y falla en forma de punto de escoba o astilla, (ver figura 12.23).

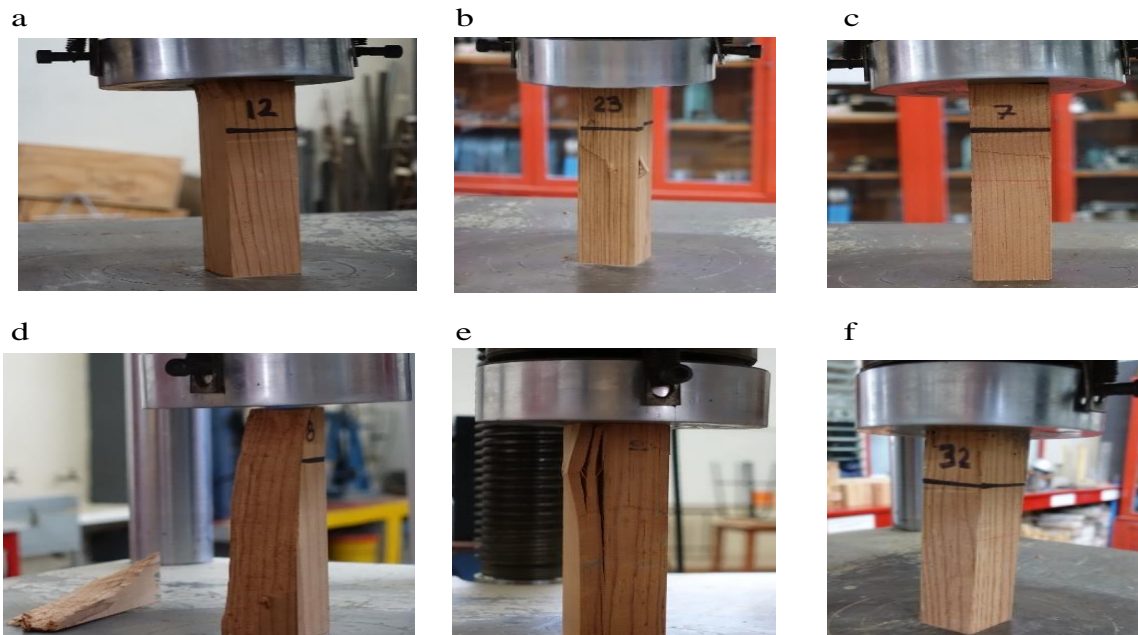


Figura 12. 22. Probetas Caso 3 en ensayo de compresión paralela a la fibra, falla de tipo cuña penetrante (a), aplastamiento (b), cortante (c), rajadura (d), compresión y cortante paralela a la fibra (e) y falla en forma de punto de escoba o astilla (f).

En el Caso 3 en el ensayo de compresión perpendicular a la fibra, los tipos de falla que se presentaron fueron, fallas por cortante, de compresión y cortante paralela a la fibra y fallas de aplastamiento (ver figura 12.24).

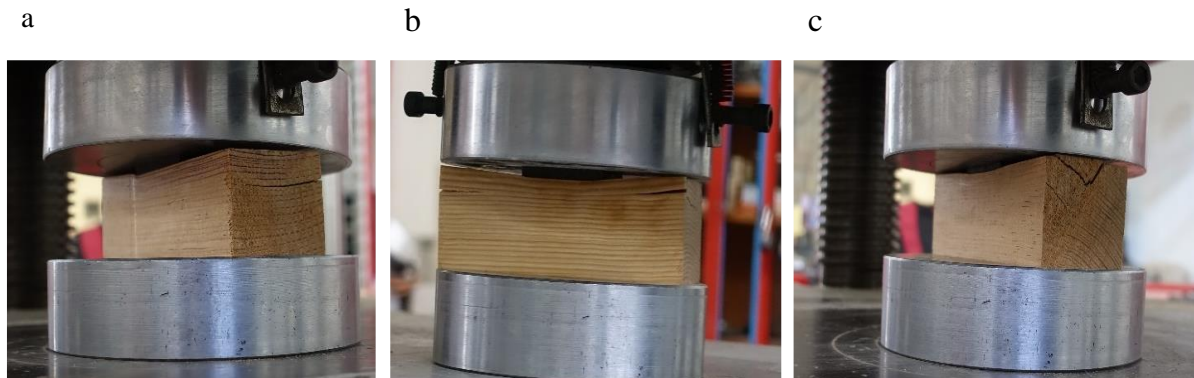


Figura 12. 23. Probetas Caso 3 en ensayo de compresión perpendicular a la fibra, falla de cortante (a), compresión y cortante paralela a la fibra (b) y aplastamiento (c).

12.11. Presentación de resultados de propiedades mecánicas de la madera resultados y análisis estadístico y procesamiento de datos

Para cada uno de los especímenes analizados, fue determinado el valor del esfuerzo máximo admisible, de acuerdo con el ensayo respectivo, así como el módulo de elasticidad del material. Esto se hizo mediante la utilización de las fórmulas presentadas con anterioridad en los puntos donde se habla del tipo de ensayo efectuado.

La totalidad de datos obtenidos de los ensayos, fueron sometidos a proceso estadístico con el objeto de obtener valores representativos y compactos de los esfuerzos bajo estudio. Los ensayos realizados con base a la norma ASTM D 143, sobre las propiedades mecánicas de la madera de pino para el caso 3, son los valores empleados para el análisis de datos en los ensayos físico-mecánicos.

12.12. Diseño experimental para el análisis de las vigas (deterioradas) para el método de ondas de esfuerzo y para las pruebas físico-mecánicas.

Las catorce vigas nuevas y las 14 vigas deterioradas (para pruebas de ultrasonido) y las 32 cabezas de las vigas (pruebas destructivas) se consideraron como muestras independientes, tanto para las pruebas de ondas de esfuerzo y los ensayos físico-mecánicas. Las variables de respuesta de cada muestra fueron el contenido de humedad (CH) y la velocidad de onda (v) en las direcciones radial-transversal (RT) y longitudinal (L), el módulo de Young (MOE), el módulo de ruptura (MOR) y esfuerzo al límite proporcional (ELP).

Se realizaron pruebas de análisis de varianza (ANOVA) y Tukey. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza de 95% fueron valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$, partiendo de las hipótesis planteadas a continuación:

Tabla 12.12. Diseño Experimental para las pruebas con Ondas de Esfuerzo en los sentidos de medición

L_L y T_R , para las pruebas fisico-mecánicas.

<ul style="list-style-type: none"> • Con el fin de determinar si hay diferencias entre las vigas <p>H_0: efecto del número de viga = 0</p> <p>H_1: efecto del número de viga $\neq 0$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el efecto del material <p>H_0: efecto del tipo de material = 0</p> <p>H_1: efecto del tipo de material $\neq 0$</p>
---	---

12.13. Resultados y análisis para las mediciones del contenido de humedad (material sano y deteriorado)

Las figuras 12.24 y 12.25 muestran el contenido de humedad en porcentaje que presentaban las vigas al momento de ser evaluadas mediante ondas de esfuerzo. Los resultados de las mediciones del contenido de humedad de la madera sana para los 14 elementos analizados fue el siguiente; los % del CH presentaban valores altos de un 21.53 % debido a que aún no estaban del todo acondicionadas a consecuencia del tratamiento de preservado.

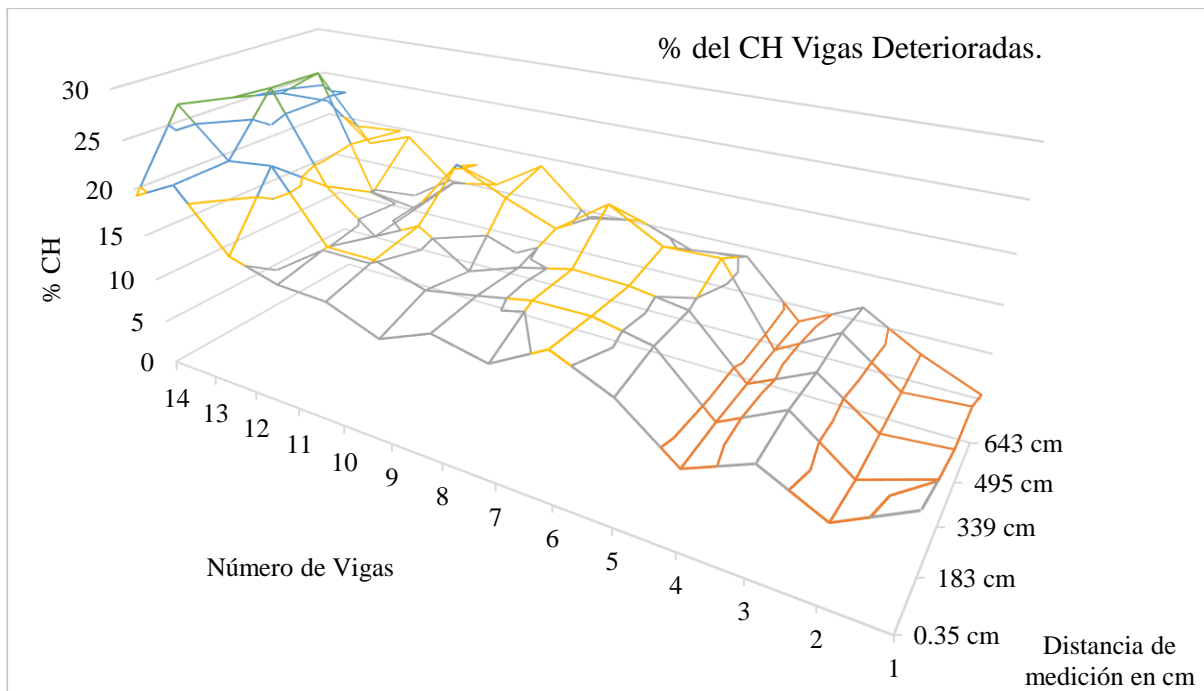


Figura 12.24. Contenido de humedad de los elementos de madera nueva.

En cambio, los valores del % del CH de los elementos retirados de madera de recuperación son menores presentando valores promedio de un 14.79 % (ver figura 12.25).

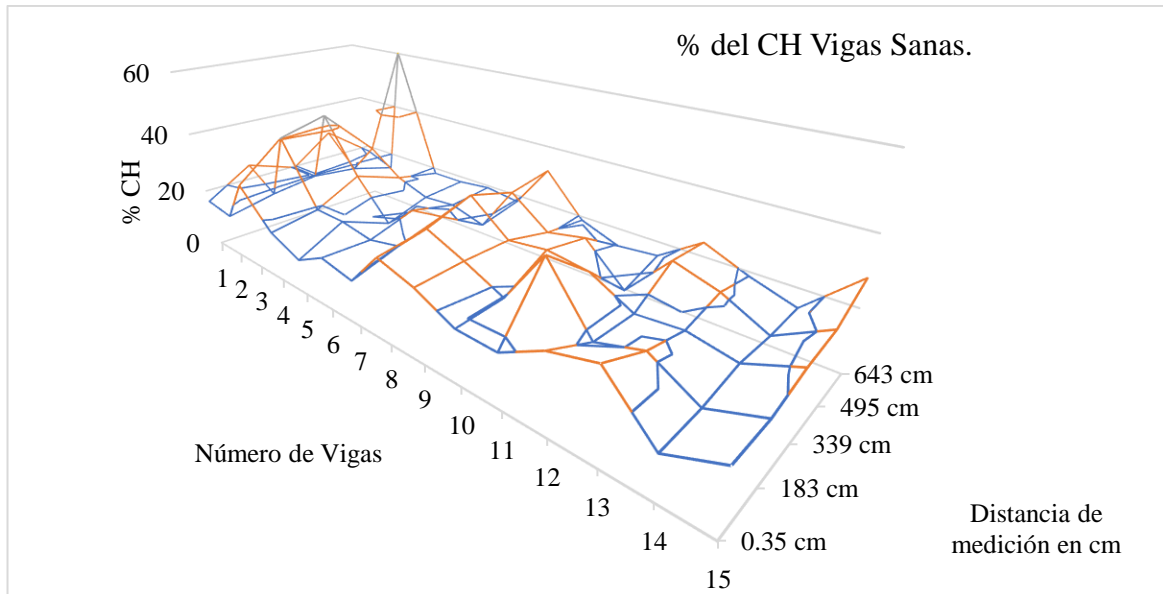


Figura 12. 25. Contenido de humedad de los elementos de madera deteriorada.

Los promedios del porcentaje del contenido de humedad de las piezas de madera sana presentaron valores mayores siendo la viga 3 la más alta de ambos grupos (40.56 %), del grupo de madera deteriorada la viga 14 fue la más alta (23.5%). Los valores menores los encontramos para la madera sana en la viga 14 (14.24%) y en la madera deteriorada en la viga 2 (7.86%), ver figura 12.26.

Es claro que los elementos de madera sustituidos presentaban porcentajes menores debido a que estos están con un contenido de humedad en equilibrio en relación con las condiciones de humedad y temperatura del interior del edificio.

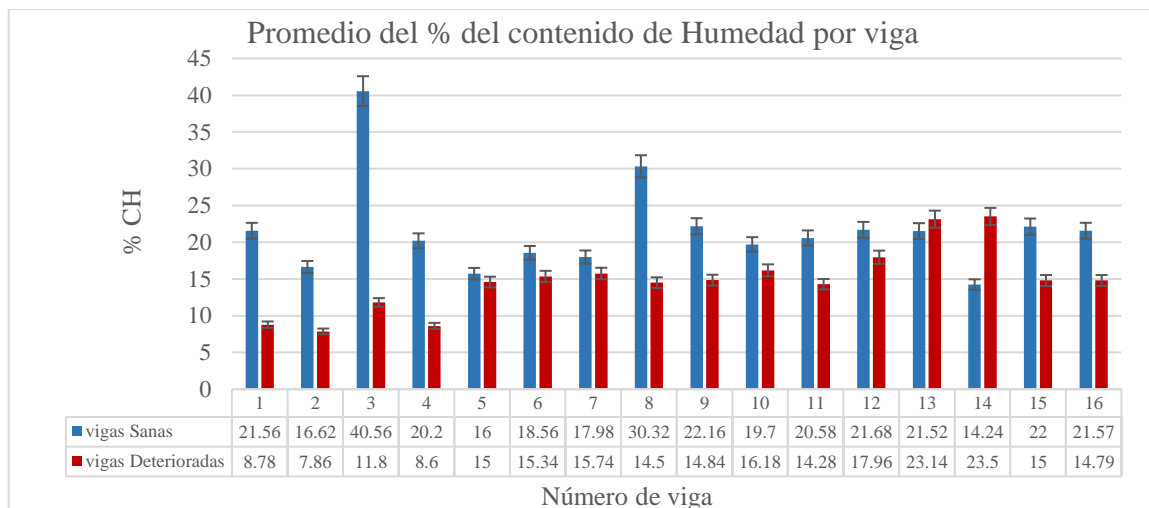


Figura 12. 26. Porcentajes del contenido de humedad de los elementos de madera sana y de madera deteriorada por viga.

El contenido de humedad fue mayor en las vigas sanas (21.57%) y en las deterioradas fue de (14.79%) con un 31.41% de diferencia entre ambos grupos, ver figura 12.27.

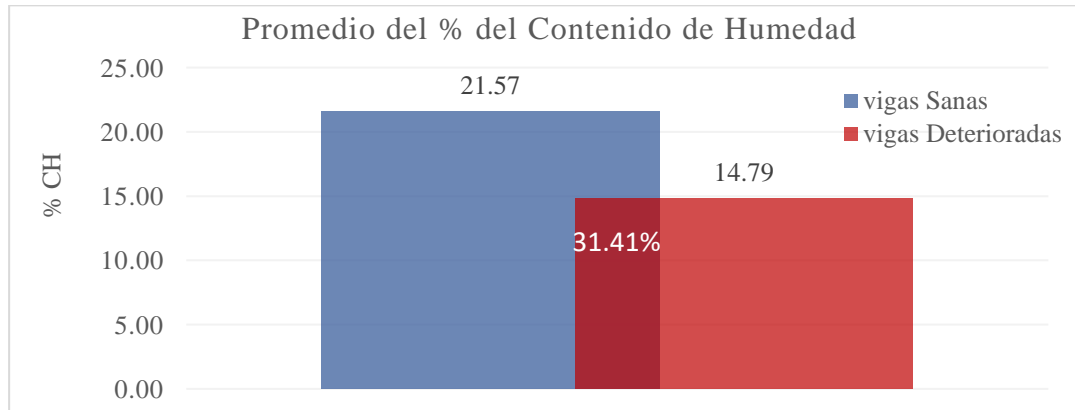


Figura 12. 27. Porcentajes del contenido de humedad de los elementos de madera sana y deteriorada.

12.14. Resultados y análisis para las mediciones de la Velocidad de Onda para las vigas de material sano y deteriorado.

Las mediciones de los promedios obtenidos de la velocidad de transmisión de la onda en el sentido longitudinal de los elementos analizados de madera. El grupo de madera deteriorada presentó valores más altos de forma general siendo la viga 10 la de valor mayor (16 221 m/s) y el valor mayor para la madera sana lo obtuvo la viga 6 (3 282.2 m/s). Los valores mínimos en la madera deteriorada la viga 9 (5 168.9 m/s) y para las muestras sanas la viga 2 presentó el valor menor (1 691 m/s), (ver figura 12.28).

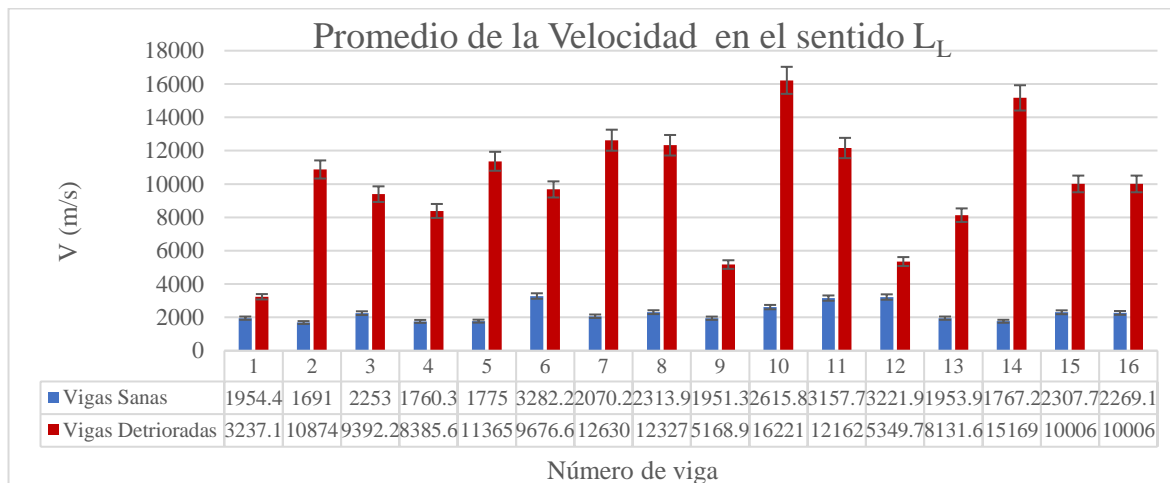


Figura 12. 28. Velocidad en el sentido longitudinal de la madera para los dos grupos.

Las mediciones de los promedios obtenidos de la velocidad de transmisión de la onda en el sentido tangencial radial para los grupos de madera sana y madera deteriorada. Se observa que los valores más altos lo presentaron la viga 1 en la madera deteriorada (1 604.09 m/s) y la viga 1

en la madera sana con (583.28 m/s), los valores menores los presentaron la viga 9 en la madera deteriorada (854.25 m/s) y la viga 9 en la madera sana con (811.04 m/s), ver figura 12.29.

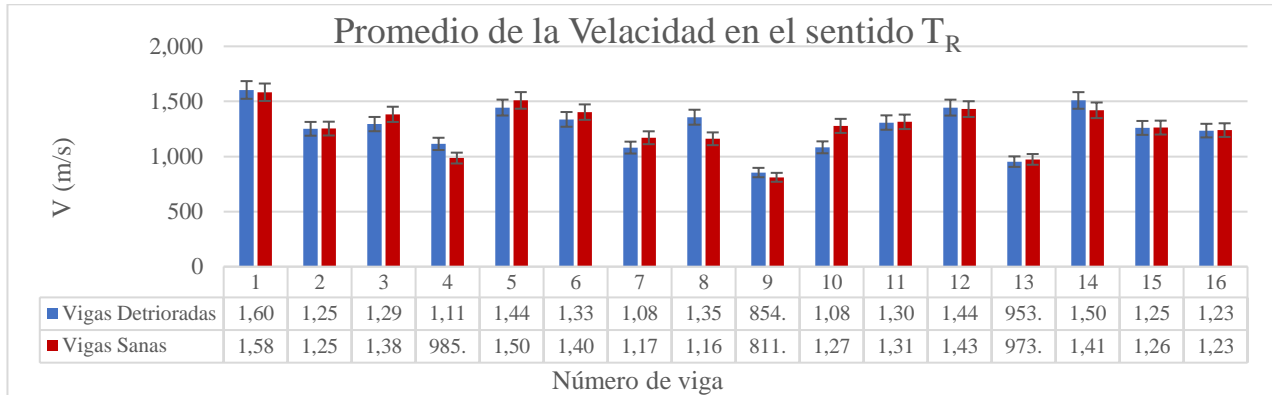


Figura 12. 29. Promedio de la Velocidad en el sentido transversal radial para los dos grupos de madera.

Así se observan los valores promedio entre un grupo y otro tienen una diferencia del 76.9% para el sentido L_L , en donde la madera deteriorada presentó valores de (10 006.31 m/s) y la madera sana (2 307.72 m/s). Para el sentido T_R el porcentaje de diferencia entre un grupo y otro fue de un 23%, siendo la madera sana la de valores mayores (1 262.55 m/s) y la madera deteriorada (1 259.60 m/s) como se puede observar en la figura 12.30.

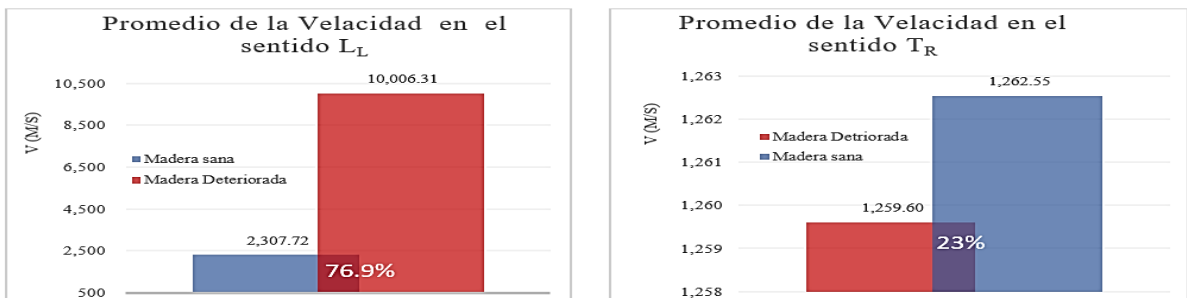


Figura 12. 30. Promedio de la Velocidad en el sentido longitudinal de la madera para los dos grupos.

Existe diferencias significativas en casi todas las vigas excepto con las vigas V1, V2, V3, V4 y V5 sanas estas no presentaron ninguna diferencia. Las vigas V7, V8 y V9 sanas presentaron diferencias significativas únicamente con la V6 sanas. La V10 solo presento diferencias significativas con las V2 y V5 sanas. (ver anexo)

12.15. Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las vigas de madera de recuperación

Las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las vigas de madera de recuperación deteriorada se obtuvieron a partir de la obtención del cálculo de la densidad gracias

al material de donación, para la madera sana no fue posible este cálculo debido a que no fue posible determinar su peso (es necesaria la densidad del material para efectuar dicho calculo).

En el sentido Longitudinal en la madera de las 16 vigas de madera de recuperación deterioradas los valores mayores se observaron en la viga 11 (38.73 Kg/cm²) y los menores en la viga 13 (5.18 Kg/cm²), ver figura 12.31.

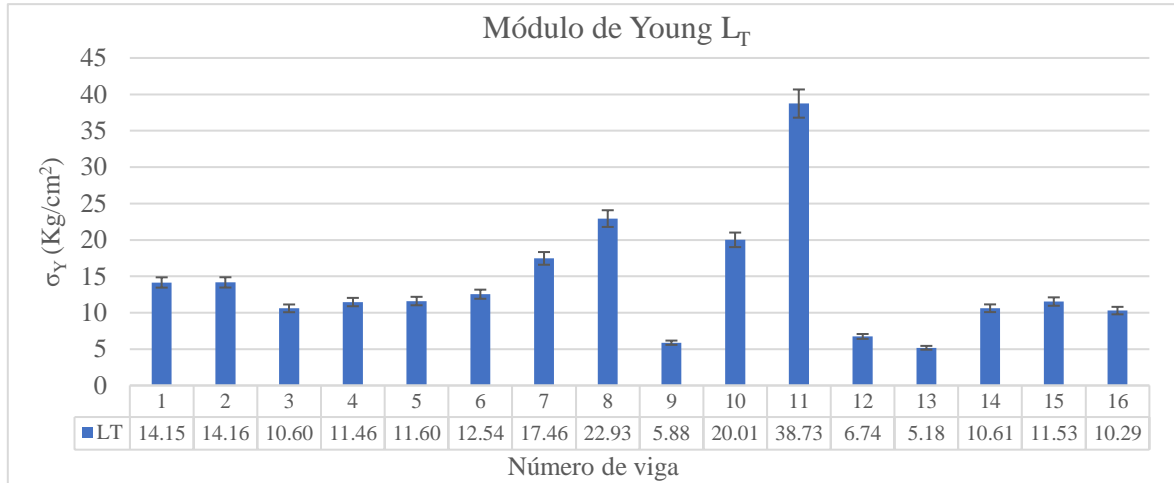


Figura 12. 31. Promedio del Módulo de Young en el sentido L_T empleando ondas de esfuerzo.

Los valores para las mediciones del Módulo de Young para el sentido T_R presentó valores mayores en la viga de madera de recuperación deteriorada 1 (1.34 Kg/cm²) y los menores en la viga de madera de recuperación deteriorada 9 (0.25 Kg/cm²). Para la dirección R_L la viga de madera de recuperación deteriorada 11 presentó el valor máximo (3.38 Kg/cm²) y la viga 10 los valores mínimos (0.20 Kg/cm²), ver figura 12.32.

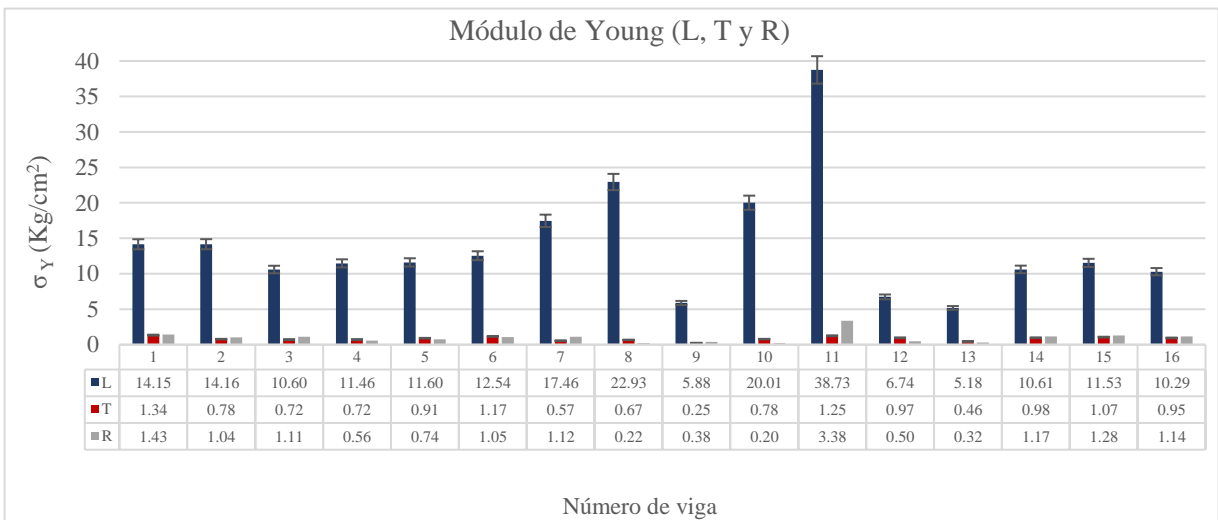


Figura 12. 32. Promedio del Módulo de Young en el sentido L, T y R empleando ondas de esfuerzo.

Los valores para las mediciones del Módulo de Young para los sentidos L, T y R. Se presentaron los valores mayores en el sentido L en la viga de madera de recuperación deteriorada 11 (38.73 Kg/cm^2) y el valor menor se encontró en la viga 9 (5.88 Kg/cm^2). Para los sentidos T y R los valores fueron menores que los obtenidos en el sentido L_L .

Para el sentido T el valor mayor lo presentó la viga de madera de recuperación deteriorada 6 (1.17 Kg/cm^2) y el menor en la viga de madera de recuperación deteriorada 9 (0.25 Kg/cm^2). Para la dirección R la viga 15 presentó el valor máximo (1.28 Kg/cm^2) y la viga de madera de recuperación deteriorada 8 los valores mínimos (0.20 Kg/cm^2).

Al realizar la comparativa de todos los valores de medición de ondas de esfuerzo en el sentido de medición L obtuvo un valor promedio de 13.99 Kg/cm^2 existe una diferencia porcentual de 93.92% entre los valores de T (0.85 Kg/cm^2) y L. Entre T y R (0.98 Kg/cm^2) la diferencia es del 15% y entre L y R es de 93.01%, ver figura 12.33.

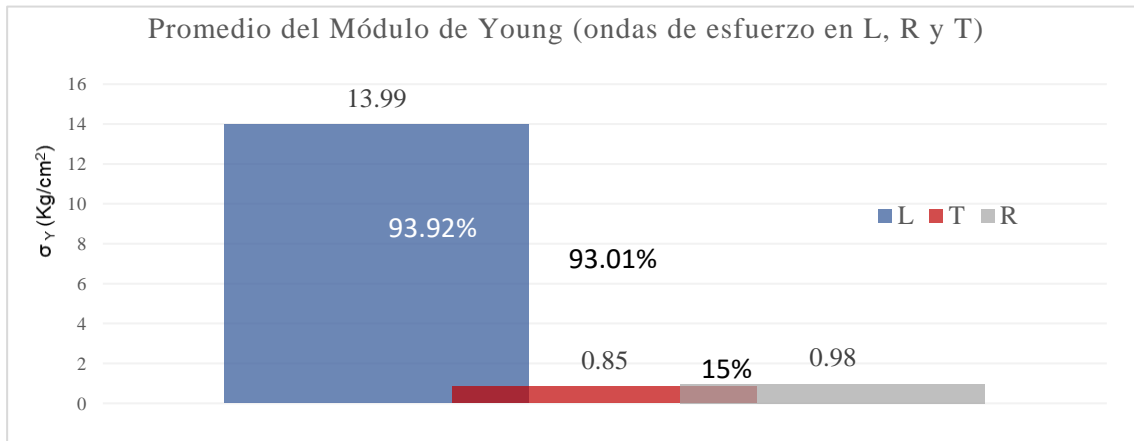


Figura 12. 33. Promedio general del Módulo de Young en el sentido L, T y R empleando ondas de esfuerzo.

12.16. Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las zonas de las cabezas de las vigas de madera de recuperación deteriorada

Las mediciones en área de las cabezas de las vigas de madera de recuperación deteriorada en el sentido tangencial radial (T_R), se muestran por separado del total de la viga debido a que las muestras del material empleado en las pruebas físico-mecánicas provienen de esta zona de la viga. Los valores promedios no son tan semejantes entre una cabeza y otra del mismo elemento, quizás a consecuencia de la carga y la distancia de apoyo en el muro de cada una de ellas. Los valores mayores los presentó la viga 11 (363.69 Kg/cm^2) y el menor la viga 9 (0.52 Kg/cm^2), ver figura 12.34.

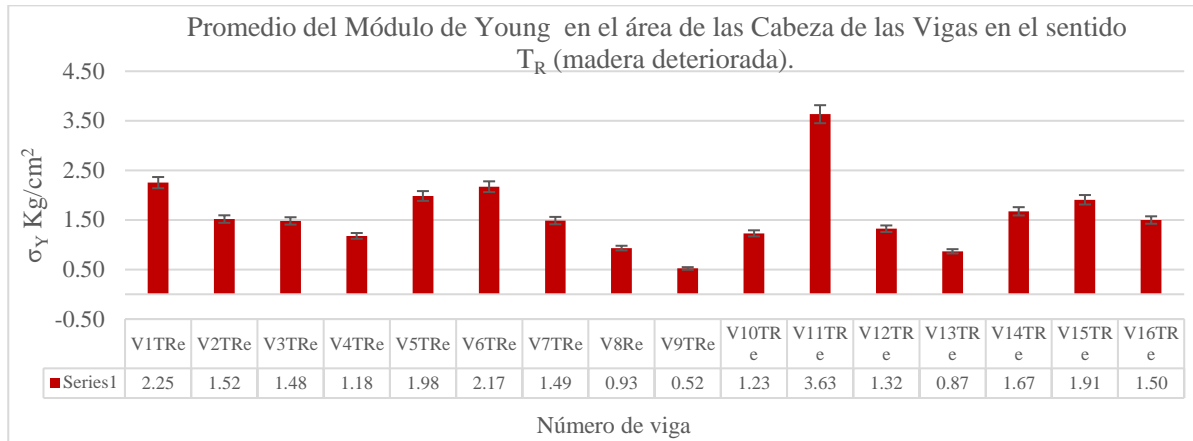


Figura 12. 34. Promedio del Módulo de Young en el sentido T_R empleando ondas de esfuerzo en la zona de las cabezas de las vigas.

La mayor parte de las vigas de madera de recuperación deteriorada presentaron diferencias estadísticamente significativas exceptuando a las vigas de madera de recuperación deteriorada 1,2,3,4,5,6,7 y 8_L. La viga de madera de recuperación deteriorada 9_L no presento diferencias significativas con las vigas de madera de recuperación deteriorada 1 y 8_L.

12.17. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas del material proveniente de las cabezas de las vigas deteriorado

En los ensayos mecánicos se analizaron 10 muestras bien orientadas para cada una de las 16 vigas. La figura 12.36 muestra los resultados de las pruebas físico-mecánicas del Caso 3. Los valores más altos se obtuvieron en las probetas de la viga de madera de recuperación deteriorada 9 (116.88 Kg/cm² para L, 5.84 Kg/cm² para T y 8.18 Kg/cm² R), en tanto que los valores mínimos se obtuvieron en la viga de madera de recuperación deteriorada 4 (50.14 Kg/cm² para L, 2.91 Kg/cm² para T y 4.07 Kg/cm² R).

Los módulos de Young se obtuvieron del cálculo correspondiente una vez tomadas las mediciones de deformación obtenidas en cada una de las probetas sometidas a carga. Se realizó la gráfica de deformación seleccionando los grupos de muestras de cada viga (valores mayores, menores y promedio de todos los grupos de muestras de cada viga).

El grupo con valores mayores los presentó la viga 9 (MOR, 874.2 Kg/cm² y MOE 772.2 Kg/cm², R²= 0.9988), los menores la viga 4 (MOR, 396.4 Kg/cm² y MOE 351.6 Kg/cm², R²= 0.9979) y los valores promedio la viga 1 (MOR, 664.1 Kg/cm² y MOE 522 Kg/cm², R²= 0.9969) ver figura 12.36.

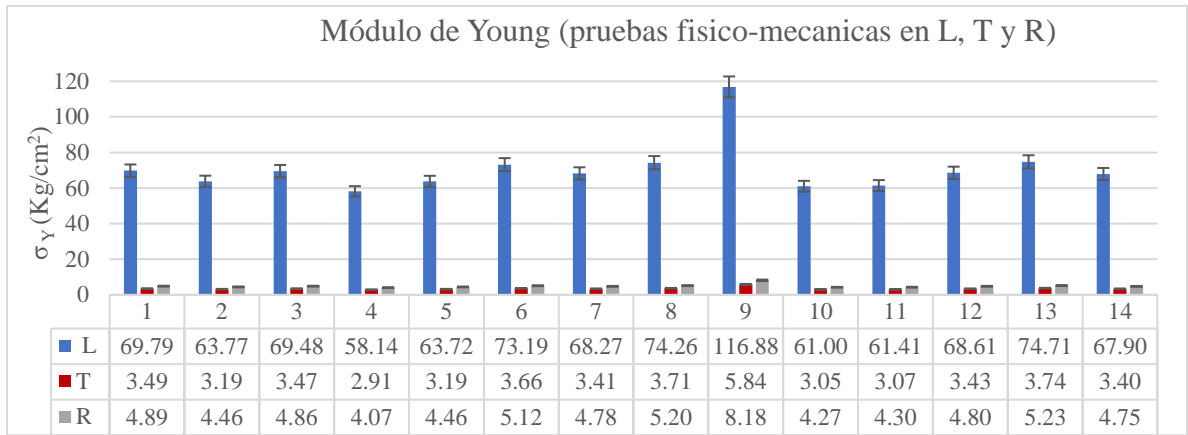


Figura 12. 35. Gráfica del módulo de Young en los tres sentidos principales de la madera.

La resistencia de la madera esta ligada a la densidad del material, para el caso 3 de esta investigación se deben de considerar que el material empleado para los ensayos físico-mecánicos proviene de las cabezas de las vigas las cuales ya han sufrido un considerable esfuerzo de tracción y de compresión (ver figura 6.8) dadas las características en las que estas estuvieron empotradas por mas de 100 años. Si consideramos el peso volumetrico como un parametro directamente ligado con la densidad del material tendremos que esta ya no es igual a la de una madera de reciente corta (material con el cual estan realizados la mayoría de estos ensayos reportados, ver apartado 6.10), ver figura 12.36.

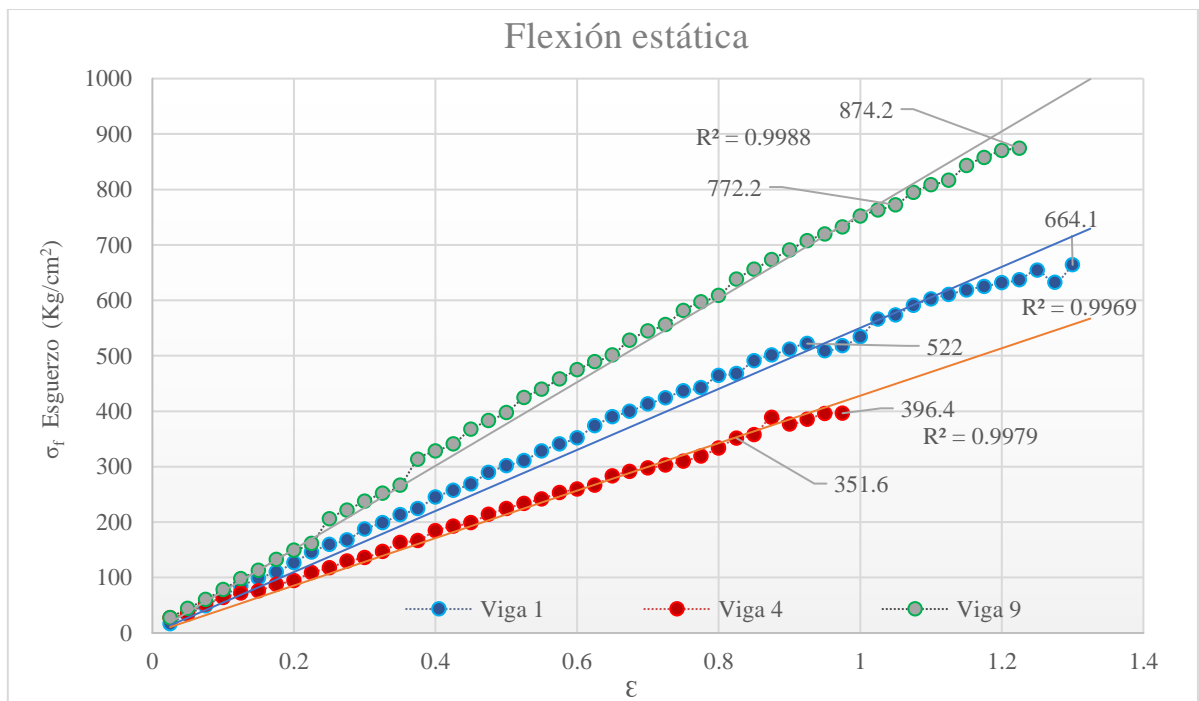


Figura 12. 36. Gráfica de esfuerzo-deformación obtenido a partir de pruebas físico-mecánicas en ensayo de flexión.

La estructura interna de la madera influye drásticamente en la capacidad de carga, ya que acepta esfuerzos máximos en el sentido longitudinal y mínimos en el sentido transversal y su comportamiento anisotrópico aumenta conforme su densidad disminuye; por lo anterior y para el caso de estas pruebas veremos una gráfica en donde no son evidentes las zona elástica y plástica de un diagrama de esfuerzos de deformación del material (ver figura 6.7) y únicamente se observan los puntos de ruptura. El comportamiento de la madera se define como Lineal elástico ya que las deformaciones se dan a la magnitud de las cargas a que esta sometida, este material al ya haber estado sometido a cargas nos presenta datos como los de la figura 12.36.

En el apartado de anexo se puede ver el análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young para ensayos Físico-mecánicos en madera deteriorada (L). En este análisis la única viga que presentó diferencias estadísticamente significativas con las otras vigas fue la viga 9 y las vigas 12,13,14 15 y 16 no presentaron diferencias significativas entre ellas.

12.18. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para el Módulo de Corte del Caso 3.

La figura 12.38 muestra los resultados del Módulo de corte del Caso 3. Los valores muestran que existe una coincidencia entre los resultados obtenidos en el Módulo de Young tanto para los ensayos de flexión en los sentidos L, T y R como con los resultados del análisis con ondas de esfuerzo. La viga de madera de recuperación 9 (7.01 Kg/cm^2 para L, 8.77 Kg/cm^2 para T y 2.10 Kg/cm^2 R), en tanto que los valores mínimos se obtuvieron en la viga de madera de recuperación 4 (3.49 Kg/cm^2 para L, 4.36 Kg/cm^2 para T y 1.05 Kg/cm^2 R), en el promedio general se observa que la viga de madera de recuperación 9 fue la de mayor valor (5.96 Kg/cm^2) y la menor fue la viga de madera de recuperación 4 (2.97 Kg/cm^2) ver figura 12.37 y 12.38.

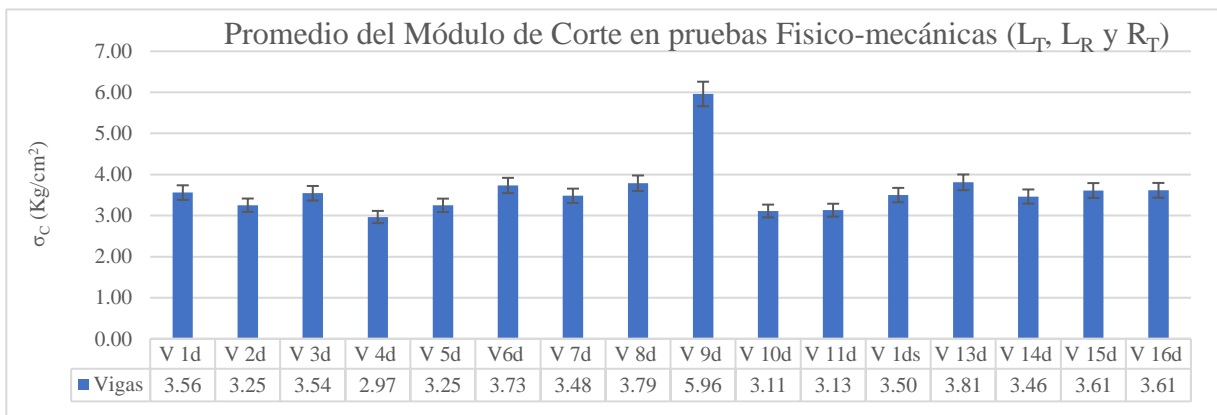


Figura 12. 37. Gráfica del Módulo de corte obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.

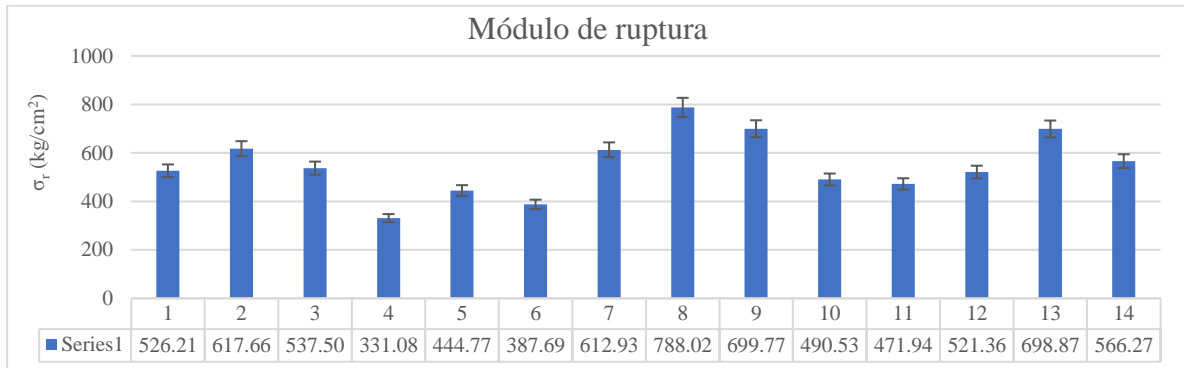


Figura 12. 38. Promedio del Módulo de corte obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.

12.19. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para el Módulo de ruptura para el Caso 3.

La figura 12.40 muestra los resultados promedio del Módulo de ruptura del Caso 3. Los valores muestran que los resultados obtenidos en el Módulo de Young en las probetas de la viga de madera de recuperación 8 fueron los más altos (788.02 km/cm²) en tanto que los valores mínimos se obtuvieron en la viga de madera de recuperación 4 (331.08 kg/cm²) y los valores promedio se presentaron en la viga de madera de recuperación 1(526.21 kg/cm²).

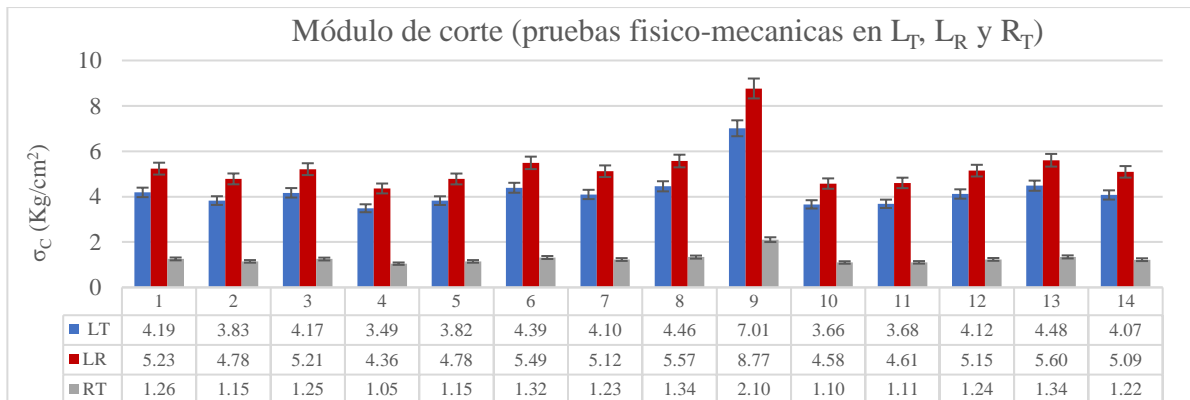


Figura 12. 39. Gráfica del promedio general del Módulo de ruptura obtenido a partir de pruebas Físico-mecánicas en ensayo de flexión.

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de ruptura para ensayos físico-mecánicos (flexión estática). Para este caso las diferencias estadísticamente significativas entre muestras fueron de menos de la mitad. Las vigas que presentaron una mayor diferencia entre el resto del grupo ueron las vigas de madera de recuperación 8 y 9, solo no presentaron diferencias con las vigas de madera de recuperación 13 y 14, y entre ellas. La viga de madera de recuperación 4

también obtuvo mayores diferencias significativas con el resto del grupo únicamente con las vigas de madera de recuperación 5,6 y 11 no se presentó diferencia (ver anexos)

12.20. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas para Compresión Paralela a la fibra

Los valores para las gráficas son el resultado del análisis de datos del ensayo de compresión en donde se consideraron 10 muestras por cada viga, exceptuando la viga de madera de recuperación 7, 15 y 16 ya que para esta viga el material no fue suficiente para la obtención de muestras. Se clasificaron los resultados por grupo para obtener el grupo de valores mayores, menores y promedios (ver figura 12.40).

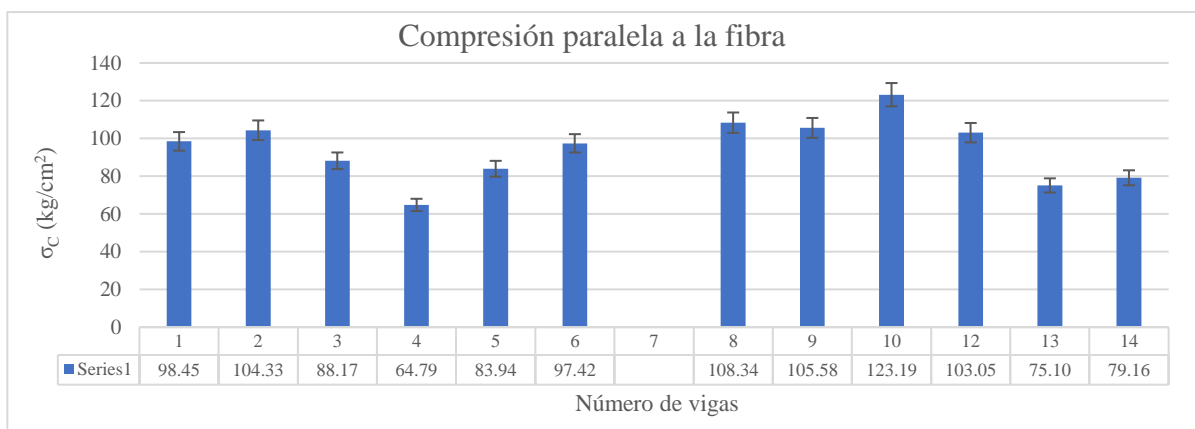


Figura 12. 40. Gráfica de resultados de las pruebas Físico-mecánicas para la prueba de compresión paralela a la fibra.

Los resultados de las pruebas Físico-mecánicas del Caso 3, para la compresión paralela a la fibra. Los valores más altos se obtuvieron en las probetas de la viga de madera de recuperación 10 (123.19 kg/cm²) en tanto que los valores mínimos se obtuvieron en la viga de madera de recuperación 14 (79.16 kg/cm²) y los valores promedio se presentaron en la viga 6 (97.42 kg/cm²). El comportamiento tensión-deformación es lineal en una primera etapa y luego tiene una línea de deformación plástica, debido al aplastamiento de la madera, sin llegar a la ruptura clara ver figura 12.41.

Los resultados promedio de los ensayos de compresión paralela a la fibra. La viga de madera de recuperación 10 presentó los resultados mayores con un promedio de (123.19 kg/cm²), la viga de madera de recuperación 14 arrojó los valores menores con un promedio de (79.16 kg/cm²) y la viga de madera de recuperación 6 con un promedio de (97.42 kg/cm²). Para las vigas de madera de recuperación 7,15 y 16, ya no fue posible realizar este ensayo debido a que la cantidad de material de donación y a las condiciones de este no permitieron la obtención de probetas.

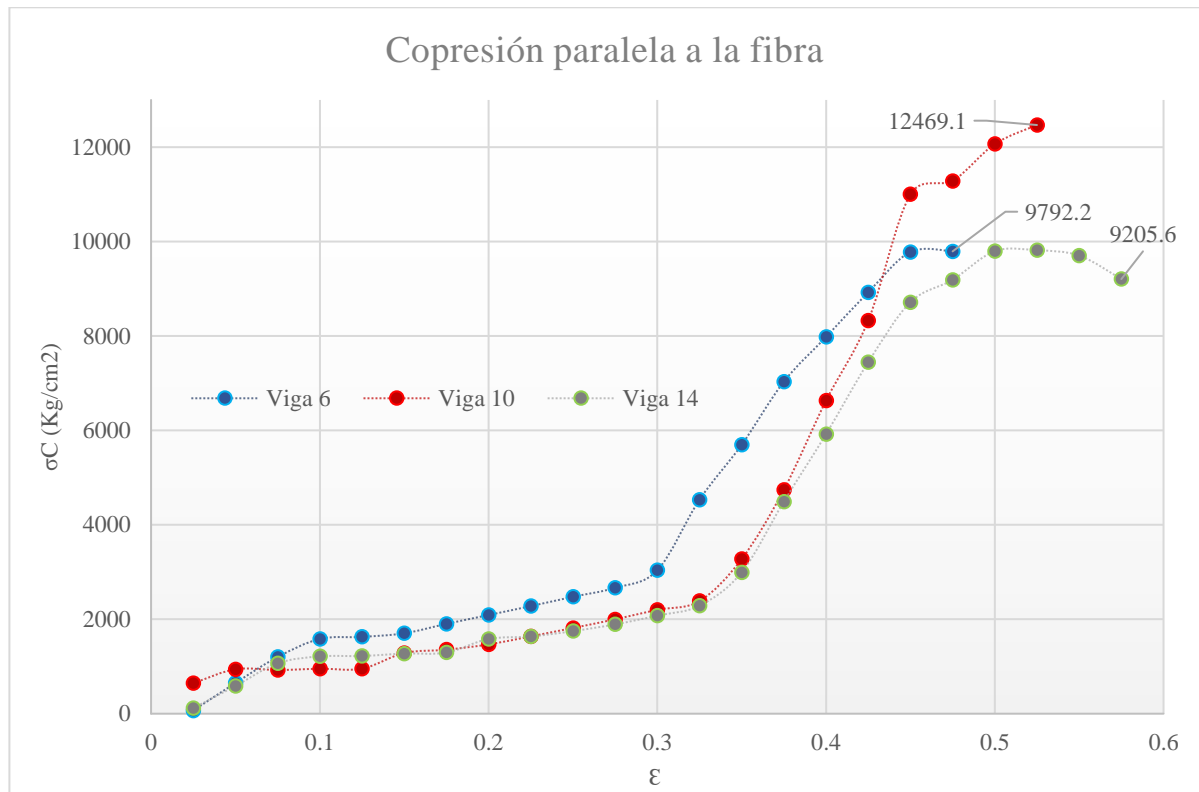


Figura 12. 41. Gráfica de esfuerzo de deformación de los valores promedio de máximos, mínimos e intermedios del ensayo de compresión paralela a la fibra.

Para el análisis de Varianza y Correlación del Módulo ruptura para ensayos Físico-mecánicos (compresión paralela a la fibra), debido a cuestiones de la cantidad de material proporcionado y debido a las condiciones de este no fue posible obtener probetas de la viga de madera de recuperación 7, 15 y 16. La mayoría de las vigas presentaron diferencias estadísticamente significativas. En el caso de la viga de madera de recuperación 4, 10 y 11 estas presentaron diferencias significativas con el resto de las muestras, (ver anexo).

12.21. Resultados y análisis de los ensayos Físico-mecánicas Compresión Perpendicular a la fibra

La figura 12.42 representa los resultados promedio de los ensayos de compresión perpendicular a la fibra. La viga de madera de recuperación 3 presentó los resultados mayores con un promedio de (94.56 kg/cm²), la viga 10 arrojó los valores menores con un promedio de (82.71 kg/cm²) y la viga 6 con un promedio de (89.49 kg/cm²). Para la viga 7 al igual que para el ensayo que no fue posible realizar; este ensayo de compresión paralela a la fibra la cantidad de material donado y a las condiciones de este, no permitió la obtención de probetas.

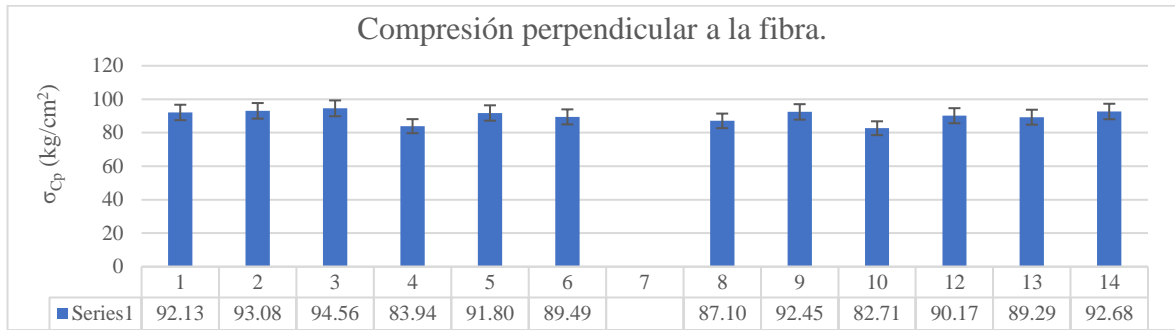


Figura 12. 42. Gráfica de resultados de las pruebas Físico-mecánicas para la prueba de compresión perpendicular a la fibra.

La figura 12.43 muestra la gráfica de esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra en donde las vigas de madera de recuperación 3, 6 y 10 del caso 3, fueron las más representativas. La viga de madera de recuperación 3 presentó los valores más altos del esfuerzo en el límite proporcional con un promedio de (12 469.1 kg/cm²). La viga de madera de recuperación 6 presentó los valores más bajos de esfuerzo en el límite proporcional promedio de 1620.8 kg/cm²). La viga de madera de recuperación 10 presentó los valores promedio del esfuerzo en el límite proporcional de (2320.4 kg/cm²).

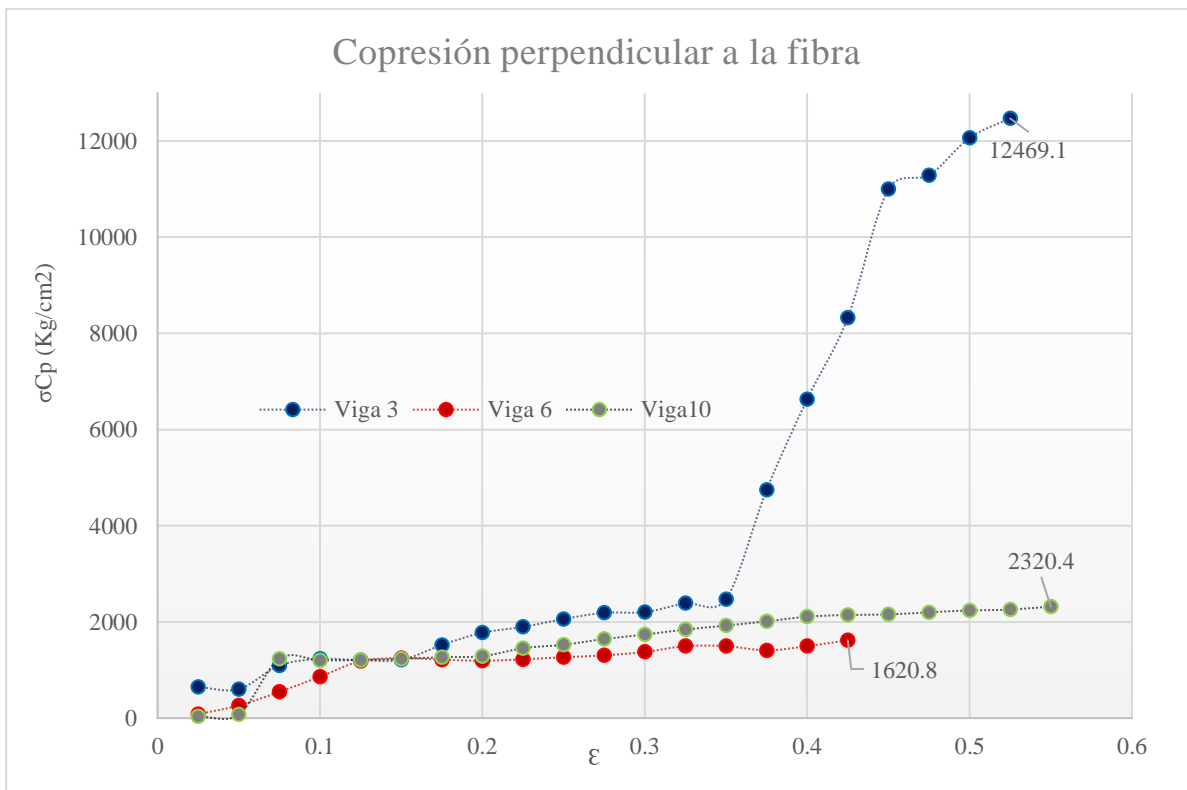


Figura 12. 43. Gráfica de esfuerzo en el límite proporcional de los valores promedio de máximos, mínimos y promedios para el ensayo de compresión perpendicular a la fibra.

En el análisis de varianza y Correlación del esfuerzo en el límite proporcional para ensayos físico-mecánicos (compresión perpendicular a la fibra), por cuestiones de la cantidad de material proporcionado y debido a las condiciones de este no fue posible obtener probetas de la viga de madera de recuperación 7, 15 y 16. En este ensayo las diferencias estadísticamente significativas solo se presentaron en unas cuantas muestras.

Las muestras de las vigas de madera de recuperación 10 y 13 presentaron diferencias significativas entre todas las muestras, mientras que para las vigas de madera de recuperación 2,3,5 y 12 no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ningún grupo. (ver anexos).

12.22. Resultados y análisis de los promedios generales de los ensayos Físico-mecánicos y de Ondas de Esfuerzo para la madera de la zona de las cabezas de las vigas

Los resultados de los ensayos físico- mecánicos para la madera de recuperación deteriorada mostraron que en el sentido L de medición los valores fueron mucho mayores que en las direcciones T y R, esto debido a las características anatómicas de la madera la cual está formada por capas de células alargadas (traqueidas) que en ese sentido de orientación fortalecen la madera aumentando su resistencia (en el caso de las pruebas destructivas).

Que permiten a la vez una mejor transmisión del sonido (en el caso de las pruebas no destructivas), haciendo que el sentido longitudinal o L sea el que preferentemente se utiliza para las evaluaciones de la madera dadas las características mencionadas en el apartado 6 y 7 de esta investigación.

Para la L el valor promedio fue de 70.79 kg/cm², para R 4.96 kg/cm² y para T de 3.54 kg/cm². La diferencia porcentual de entre L y T fue de un 93%, entre R y T de 28.57% y entre L y T de 95%, estas diferencias entre los valores de resistencias y los diferentes sentidos de medición de la madera son las condiciones constantes del comportamiento de este material (se ha hecho referencia por diversos autores en los apartados 6 y 7 de esta investigación sus distintas propiedades y características) que en la mayor parte de los estudios citados se presentan resultados solo en el sentido L y en menor ocasión a los sentidos de medición T y R, (ver figura 12.44).

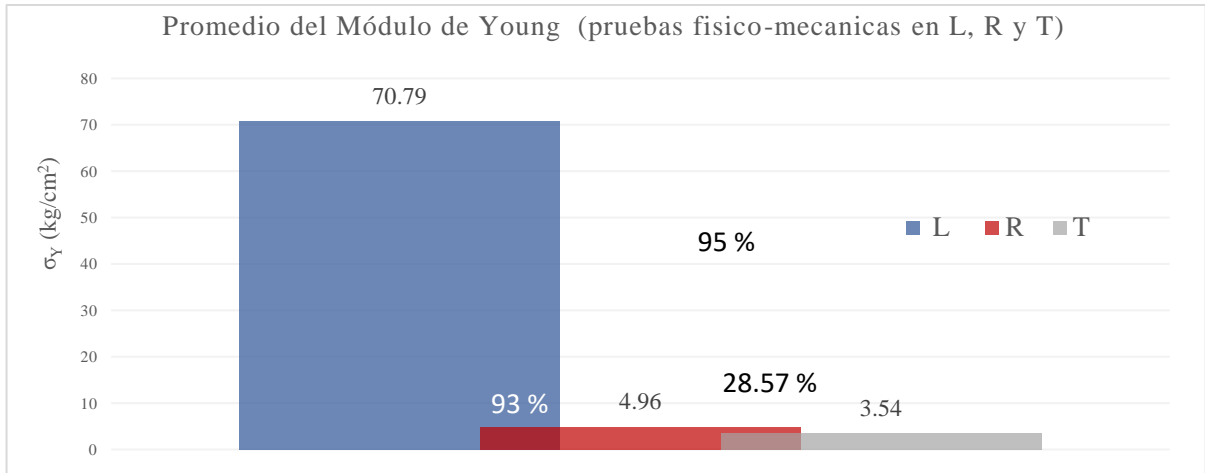


Figura 12. 44. Promedios del cálculo del módulo de Young para pruebas físico- mecánicas en el sentido L, T y R.

Finalmente, la comparación entre los ensayos físico-mecánicos y las mediciones ultrasónicas en campo se compararon en el sentido de medición Transversal Radial ya que este es el sentido al cual se pudo acceder con el equipo de campo en el caso de la madera estructural *in situ*. La diferencia entre estas dos pruebas permite obtener un nivel de certitud de que los ensayos no destructivos pueden ser aplicables a diagnósticos previos en estructuras de madera y observar el rango de error que se podría presentar entre una técnica controlada (laboratorio) y otra en campo (condiciones reales no controladas de las variables de medición).

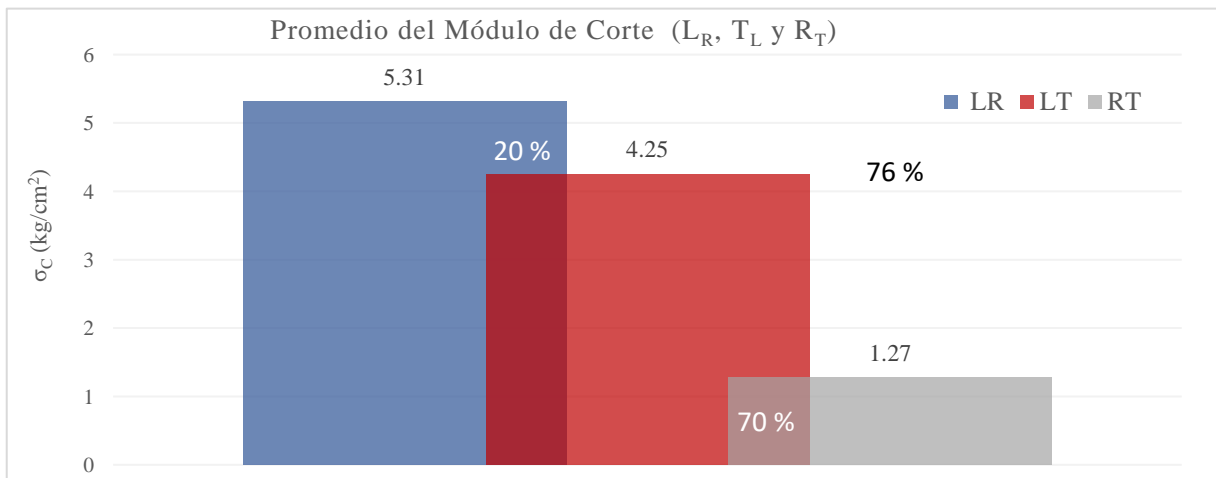


Figura 12. 45. Promedios del cálculo del módulo de Young para pruebas físico-mecánicas en el sentido L_R, L_T y R_T.

El promedio general para el Módulo de Young en el sentido de medición T_R empleando la técnica no destructiva de ondas de esfuerzo y ensayos de flexión estática, determinaron que los valores de las pruebas mecánicas (laboratorio) presentaron un valor promedio de (6.02 kg/cm²)

y los obtenidos con el equipo Fakoop (*in situ*), que fueron de (1.6 kg/cm^2). Entre ambos análisis se encontró una diferencia del 73.38% como lo muestra la figura 12.46.

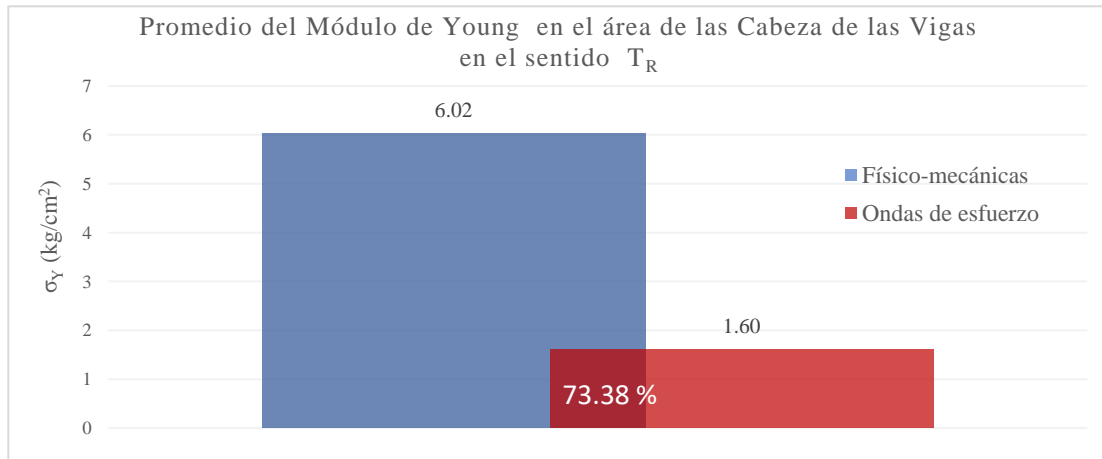


Figura 12. 46. Promedio general del Módulo de Young en el sentido T_R en el material de las cabezas de las vigas (empleando ondas de esfuerzo y ensayos Físico-mecánicos).

La diferencia de las mediciones de ambas técnicas del Módulo de Young en el sentido de medición T_R indican que los valores obtenidos en campo son menores a la resistencia real del material y tentativamente se podría decir que la madera medida *in situ* será un 50% más resistente a los valores que se obtengan en una inspección (es recomendable efectuar más estudios de este tipo para una mejor certeza de las diferencias de medición entre ambas técnicas y equipos). Para un diagnóstico previo a la intervención conocer esta diferencia de resistencia resulta muy conveniente en la toma de decisiones de sustitución, mantenimiento o restauración de las estructuras de madera.

El promedio del porcentaje del contenido de humedad en las vigas fue y es siempre importante en la obtención e interpretación de los datos. Para este caso el porcentaje del contenido de humedad fue mayor en la madera *in situ* que el de las muestras de madera para los ensayos físico-mecánicos, esto debido a que las probetas fueron colocadas dentro de una cámara de secado con el fin de tener controlado ese factor previo a los ensayos, en tanto que en el caso de las vigas los valores fueron tomados dentro del edificio, en las condiciones en las cuales se encontraban colocadas.

Los valores mayores fueron en la viga de madera recuperada 14 (viga 23.5% y para las probetas de 6.6%) y los valores menores para las vigas fue en la 2 (7.86%) y para las probetas fue la viga de madera recuperada 1 (5.53%), ver figura 12.47.

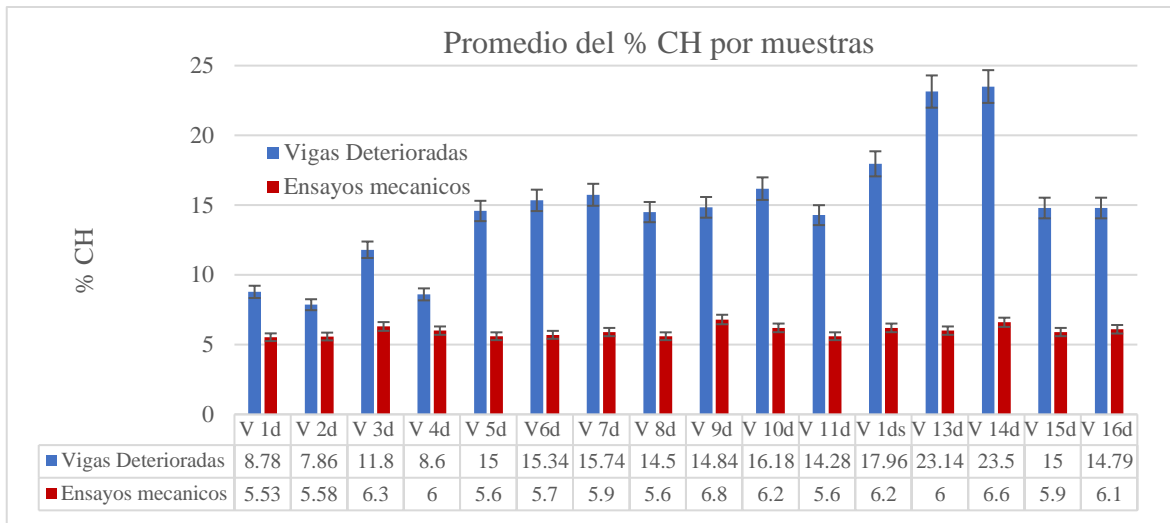


Figura 12. 47. Promedio del % CH en las vigas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.

El promedio del porcentaje del contenido de humedad entre las vigas de madera sanas y las vigas de madera recuperada deterioradas fue mayor que el de las muestras para los ensayos físico-mecánicos (las probetas fueron colocadas dentro de una cámara de secado con el fin de tener controlado ese factor previo a los ensayos), para las vigas sanas los valores altos se deben a que esta madera tenía poco tiempo de haber sido cortadas (madera verde), en tanto que en el caso de las vigas deterioradas los valores fueron tomados dentro del edificio. Los valores mayores fueron para las vigas sanas (21.57%), para las vigas deterioradas (14.79%) y para las probetas de 5.97%. la diferencia entre las vigas sanas y las deterioradas fue de 31.41%, entre las vigas deterioradas y las probetas fue de 59.64%, y entre las vigas sanas y las probetas de 72.32%, ver figura 12.48.

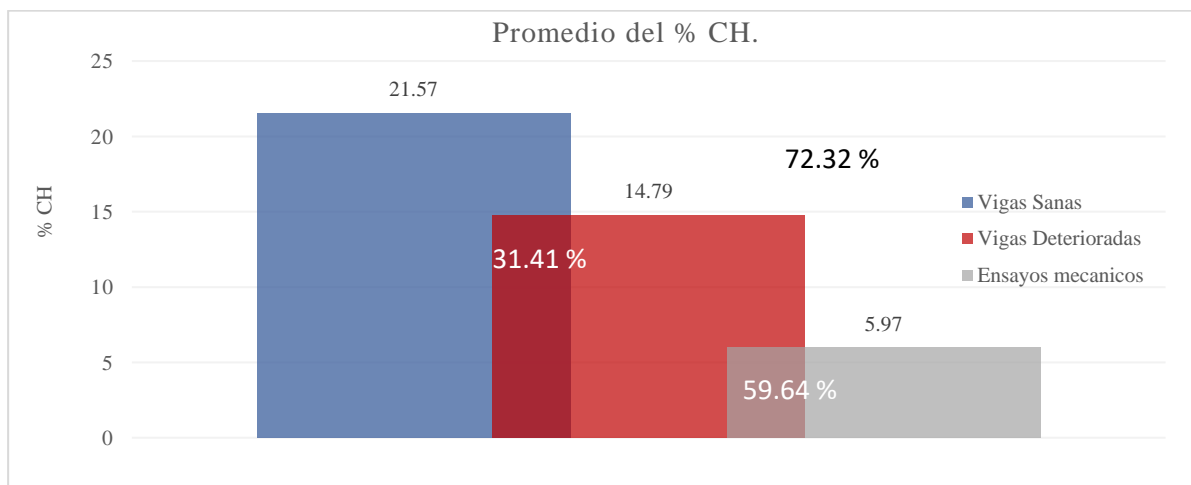


Figura 12. 48. Promedio del % CH en las vigas sanas, deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.

El promedio del porcentaje del número de anillos de crecimiento entre las vigas deterioradas fue mayor que el de las muestras para los ensayos físico-mecánicos. Para ambos grupos la viga de madera recuperada 14 y la viga de madera recuperada 9 presentaron el mayor número de anillos de crecimiento (78 en viga y 22 en probetas). Los valores mínimos los presentaron en ambos grupos la viga de madera recuperada 4 (31 en viga y 7 en probetas), ver figura 12.49.

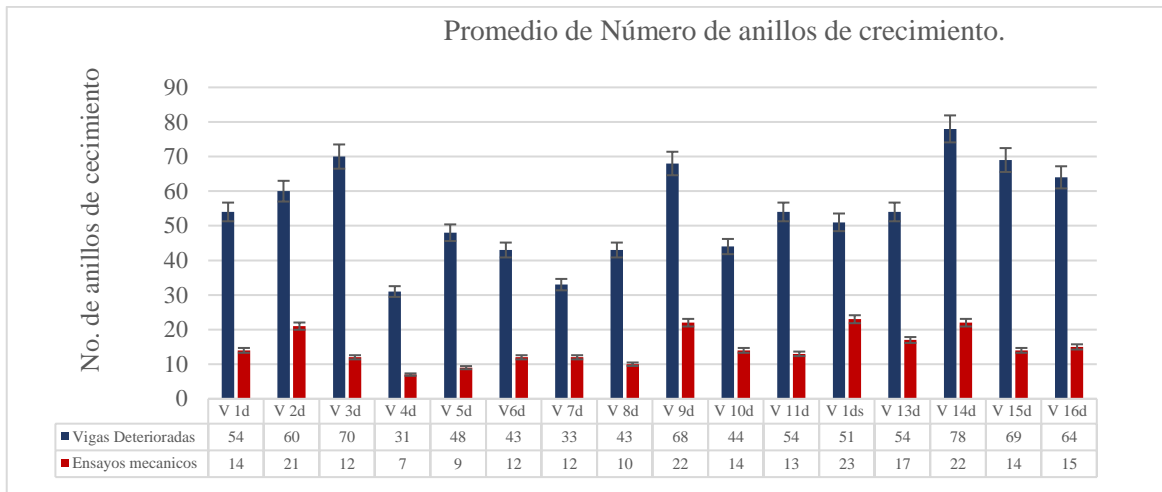


Figura 12. 49. Promedio del número de anillos de crecimiento en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos Físico-mecánicos.

El promedio del porcentaje del número de anillos de crecimiento entre las vigas deterioradas fue mayor que el de las muestras para los ensayos físico-mecánicos, (54 anillos de crecimiento en las vigas y 14.81 en las probetas) la diferencia entre ambos grupos fue 72.57%, ver figura 12.50.

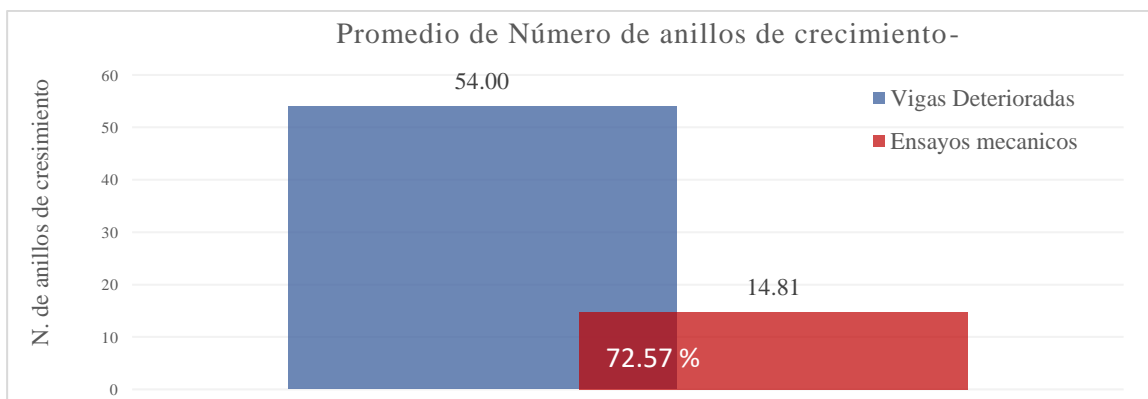


Figura 12. 50. Promedio general del número de anillos de crecimiento en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.

El promedio del porcentaje de la densidad entre las vigas deterioradas y las muestras para los ensayos físico-mecánicos dio valores mayores en ambos grupos en la viga de madera recuperada 11 (767.58 kg/cm^3 en vigas y 752.56 kg/cm^3 en prometas) y los menores en la viga de madera recuperada 9 (316.30 kg/cm^3 en vigas y 422.07 kg/cm^3 en prometas), ver figura 12.51.

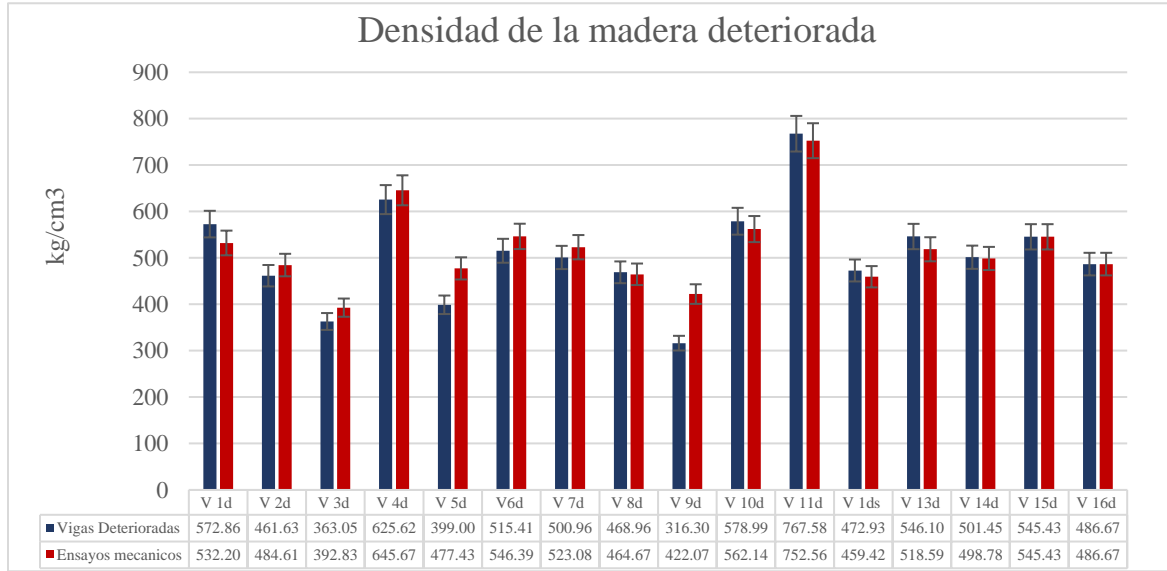


Figura 12. 51. Promedio de la densidad en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos físico-mecánicos.

El promedio del porcentaje de la densidad entre las vigas deterioradas presentó valores menores (507.68 kg/cm^3) y las muestras para ensayos físico-mecánicos fueron mayores (519.53 kg/cm^3 en probetas). La diferencia entre ambos grupos fue de 2.33% ver figura 12.52.

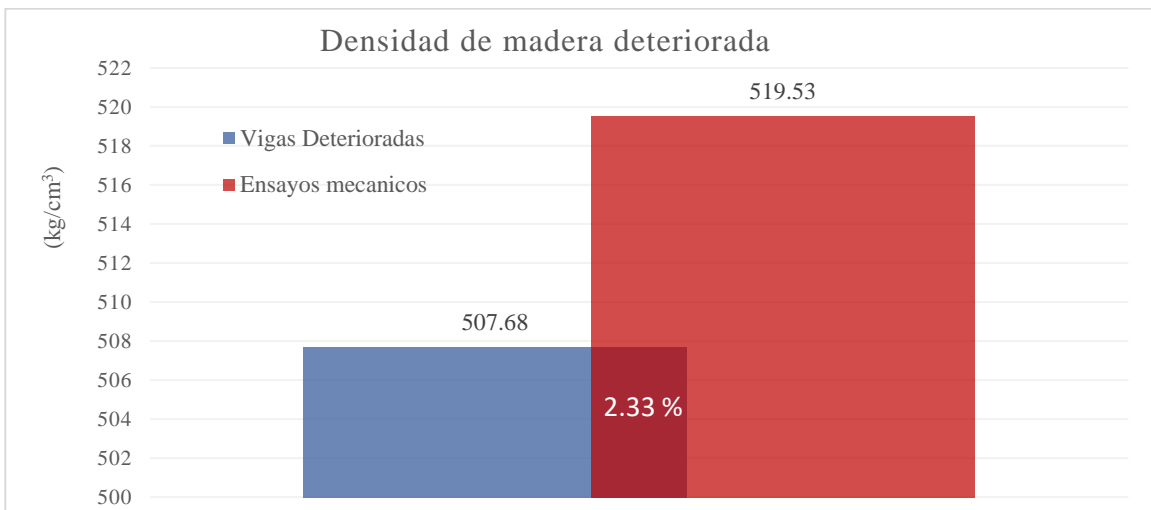


Figura 12. 52. Promedio general de la densidad en las vigas deterioradas y en las muestras para ensayos Físico-mecánicos.

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young en el sentido T_R , ensayos físico-mecánicos y ondas de esfuerzo (cabezas de vigas de madera recuperada). Las diferencias entre el grupo fueron de un 50 por ciento entre muestras. Las muestras de las vigas de madera recuperada $9T_{RM}$ y $11T_{RE}$ presentaron diferencias significativas entre todas las vigas del grupo de estudio (ver anexo).

12.23. Conclusiones para el Caso 3

Las normas europeas para ensayos de flexión han eliminado el uso de ensayos en probetas de sección pequeñas y prefieren sean ensayados los elementos estructurales en tamaño real esto debido a que los resultados resultan complejos de analizar si no se tienen bases suficientes sobre el conocimiento de la madera.

La mayoría de la normativa está enfocada a madera sana o de reciente corta y la madera de recuperación deteriorada o en uso estructural (periodos mayores a los 100 años), no se considera debido a que esta no tiene la misma frecuencia de uso que la anterior (solo en casos muy específicos es que es analizada).

Los resultados del Caso 3 se componen de varios puntos que se explican de forma más extensa a continuación, pero previo a esto la conclusión general del análisis de la aplicación de la técnica no destructiva en campo y las pruebas destructivas empleando ensayos físico-mecánicos, que entre ambas técnicas existe una diferencia de medición del Módulo de Young de un 73.38% (los ensayos mecánicos fueron mayores).

La diferencia entre estas dos técnicas puede deberse a factores como el % CH que fue mayor en las vigas (72.32% entre grupos), el número de anillos por muestra y por viga (72.57% entre grupos) siendo mayor en las vigas y la densidad que fue mayor en las probetas (2.33% entre grupos).

Los porcentajes de diferencia en los puntos anteriores son similares a la diferencia que existe entre el módulo de Young de ambas técnicas. Los ensayos no destructivos analizan los materiales desde un punto de vista volumétrico en tanto que los ensayos mecánicos son de tipo puntual (aplicación de la fuerza sobre una sección determinada de la muestra).

Solo en la densidad no se encontró una diferencia tan marcada entre ellas ya que este valor se calcula en base al volumen y el peso de la muestra. La diferencia radica en que las cabezas de las vigas presentaban mayor porosidad debido a sus condiciones de uso y las probetas, aunque provienen de este mismo material fue limpiado, orientado y acondicionado en su CH.

Se puede decir entonces que la técnica no destructiva de ondas de esfuerzo en campo puede ayudar para tener una idea de las condiciones de la vigería que estarían por debajo de los valores reales que esta madera pudiera soportar. Se podría considerar que este tipo de inspección ayudaría para hacer un pronóstico de durabilidad del material alrededor de un 50% de error. Lo positivo es que este valor es menor al que realmente aún está en posibilidades de soportar la viga.

12.23.1. Conclusiones y análisis de resultados para el Contenido de humedad para el Caso 3.

El contenido de humedad entre las vigas sanas y deterioradas fue mayor que el de las muestras para los ensayos físico-mecánicos (las probetas fueron colocadas dentro de una cámara de secado con el fin de tener controlado ese factor previo a los ensayos), para las vigas sanas los valores altos se deben a que esta madera tenía poco tiempo de haber sido cortadas (madera verde), en tanto que en el caso de las vigas deterioradas los valores fueron tomados dentro del edificio.

Los valores mayores fueron para las vigas sanas (21.57%), para las vigas deterioradas (14.79%) y para las probetas de 5.97%. la diferencia entre las vigas sanas y las deterioradas fue de 31.41%, entre las vigas deterioradas y las probetas fue de 59.64%, y entre las vigas sanas y las probetas de 72.32%.

12.23.2. Conclusiones y análisis del Número de anillos.

El número de anillos entre las vigas de madera de recuperación deterioradas fue mayor que el de las muestras para los ensayos físico-mecánicos. Para ambos grupos la viga de madera de recuperación 14 y la viga de madera de recuperación 9 presentó el mayor número de anillos (78 en viga y 22 en probetas). Los valores mínimos los presentó en ambos grupos la viga de madera de recuperación 4 (31 en viga y 7 en probetas).

12.23.3. Conclusiones y análisis de la Densidad.

La densidad entre las vigas de madera de recuperación deterioradas presentó valores menores (507.68 kg/cm^3) y las muestras para ensayos físico-mecánicos fueron mayores (519.53 kg/cm^3 en probetas). La diferencia entre ambos grupos fue de 2.33%

12.23.4. Conclusiones y análisis de resultados de Ensayo no destructivo mediante ondas de esfuerzo.

La **Velocidad de Onda** entre el grupo de madera sana y de madera de recuperación deteriorada la diferencia entre ellas fue del 76.9% para el sentido L_L , en donde la madera deteriorada presentó valores de $10\,006.31 \text{ m/s}$ y la madera sana ($2\,307.72 \text{ m/s}$). Para el sentido T_R el porcentaje de diferencia entre un grupo y otro fue de un 23%, siendo la madera sana la de valores más altos se

presentaron en la madera de madera de recuperación deteriorada (1 262.55 m/s) y en la sana fueron menores (1 259.60 m/s).

El análisis de varianza y la Correlación de la velocidad de onda madera sana y de madera de recuperación deteriorada la en el sentido L_L entre los dos grupos de vigas existe diferencias significativas entre la mayoría de ellas excepto con las vigas de madera de recuperación 1,2,3,4 y 5s estas no presentaron ninguna diferencia, en el sentido T_R , existen diferencias significativas únicamente entre la vigas de madera sanas 10s y las vigas sanas 1s, y7s.

El **Módulo de Young** en promedio el sentido L obtuvo un valor de 13.99 Kg/cm², el sentido T de 0.85 Kg/cm² y el R de 0.98 Kg/cm², existe una diferencia porcentual de 76.9% entre los valores del sentido L y los de las mediciones del Módulo de Young fueron mayores en el sentido L en la viga 11 (38.73 Kg/cm²) para el sentido T el valor mayor lo presentó la viga 6 (1.17 Kg/cm²) y para la dirección R la viga 15 presentó el valor máximo (1.28 Kg/cm²). La diferencia porcentual de L y T fue de 93.92%, entre T y R es del 15% y para L y R fue de 93.01%.

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young para ondas de esfuerzo para madera deteriorada (L_L y T_R), la mayor parte de las vigas presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas exceptuando a las V1,2,3,4,5,6,7 y 8L. Para la madera deteriorada en los sentidos T y R fueron solo algunas de las vigas las que mostraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos sentidos.

12.23.5. Conclusiones y análisis de los Ensayos (destrutivos) físico-mecánicos

Para los **ensayos de flexión estática** se presentaron en las probetas de madera de recuperación deteriorada se presentaron fallas de tensión simple, falla de tensión en sentido contrario de las fibras (vista lateral de la muestra) y falla de tensión astillada. El grupo con valores mayores los presentó la viga de madera de recuperación 9 con un módulo de ruptura de (MOR), 874.2 Kg/cm² y un módulo de Young de (MOE) 772.2 Kg/cm² y una $R^2= 0.9988$, los menores la viga de madera de recuperación 4 módulo de ruptura de (MOR) 396.4 Kg/cm² y un módulo de Young de (MOE) 351.6 Kg/cm² y una $R^2= 0.9979$ y los valores promedio la viga de madera de recuperación 1 módulo de ruptura de (MOR) 664.1 Kg/cm² y un módulo de Young de (MOE) 522 Kg/cm² y una $R^2= 0.9969$.

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young para ensayos físico-mecánicos en madera deteriorada (L, T y R), mostró que solo existió diferencias estadísticamente significativas con la viga de madera de recuperación 9 y las vigas de madera de recuperación 12,13,14 15 y 16 no presentaron diferencias significativas entre ellas.

El promedio del cálculo del **Módulo de Corte** en general se observó que la viga de madera de recuperación 9 fue la de mayor valor (5.96 Kg/cm^2) y la menor fue la viga de madera de recuperación 4 (2.97 Kg/cm^2).

El **Módulo de Ruptura** mostro los valores mayores en la viga de madera de recuperación 8 (788.02 km/cm^2) en tanto que los valores mínimos se obtuvieron en la viga 4 (331.08 kg/cm^2) y los valores promedio se presentaron en la viga de madera de recuperación 1 (526.21 kg/cm^2).

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de Ruptura para ensayos físico-mecánicos (flexión estática). Las diferencias estadísticas se presentaron con las vigas de madera de recuperación 8 y 9, las cuales presentaron diferencias estadísticas con las vigas de madera de recuperación 13 y 14, y entre ellas. La viga de madera de recuperación 4 también obtuvo mayores diferencias significativas con el resto del grupo únicamente con las vigas de madera de recuperación 5,6 y 11 no se presentó diferencia.

En el ensayo de **Compresión paralela a la fibra** las muestras presentaron fallas del tipo paralela a la fibra, falla tipo cuña penetrante, aplastamiento, cortante, rajadura, compresión y cortante paralela a la fibra y falla en forma de punto de escoba o astilla.

La viga de madera de recuperación 3 presentó los resultados mayores con un promedio de (94.56 kg/cm^2), la viga de madera de recuperación 10 arrojó los valores menores con un promedio de (82.71 kg/cm^2) y la viga de madera de recuperación 6 con un promedio de (89.49 kg/cm^2). Las vigas de madera de recuperación 3, 6 y 10 fueron las más representativas la viga de madera de recuperación 3 presentó los valores más altos del esfuerzo en el límite proporcional con un promedio de $12\,469.1 \text{ kg/cm}^2$, la viga de madera de recuperación 6 presentó los valores más bajos de esfuerzo en el límite proporcional promedio de 1620.8 kg/cm^2 y la viga de madera de recuperación 10 presentó los valores promedio del esfuerzo en el límite proporcional de 2320.4 kg/cm^2 .

El análisis de varianza y Correlación del Esfuerzo en el Límite Proporcional para ensayos físico-mecánicos (compresión perpendicular a la fibra) En este ensayo las diferencias estadísticamente significativas solo se presentaron en unas cuantas muestras, las vigas de madera de recuperación 10 y 13 presentaron diferencias significativas entre todas las muestras, mientras que para las vigas 2,3,5 y 12 no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ningún grupo.

Los resultados de los ensayos físico- mecánicos para la madera deteriorada mostraron que en el sentido L de medición los valores fueron mucho mayores que en las direcciones T y R. Para la L el valor promedio fue de 70.79 kg/cm^2 , para R 4.96 kg/cm^2 y para T de 3.54 kg/cm^2 . La diferencia porcentual de entre L y T fue de un 93%, entre R y T de 28.57% y entre L y T de 95%.

El **Módulo de Corte** para la madera deteriorada en el sentido L_R de la madera fueron mayores que en las direcciones T_L y R_T . Para la L_R el valor promedio fue de 5.31 kg/cm^2 , para T_L 4.25 kg/cm^2 y para R_T de 1.27 kg/cm^2 . La diferencia porcentual de entre L_R y T_L fue de un 20%, entre T_L y R_T de 70% y entre L_R y R_T de 76%.

Módulo de Young en el sentido T_R , ensayos físico-mecánicos y ondas de esfuerzo en zonas de las cabezas de las vigas.

El **Módulo de Young** en el sentido de medición T_R empleando la técnica no destructiva de ondas de esfuerzo y ensayos de flexión estática, determinaron que los valores de las pruebas mecánicas son mayores (6.02 kg/cm^2) que los obtenidos con el equipo Fakoop (1.6 kg/cm^2). Entre ambos análisis se encontró una diferencia del 73.38%.

El análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young en el sentido T_R , ensayos físico-mecánicos y ondas de esfuerzo (cabezas de vigas). Las diferencias entre el grupo fueron de un 50 por ciento entre muestras. Las muestras de las vigas de madera de recuperación $9T_{RM}$ y $11T_{RE}$ presentaron diferencias significativas entre todas las vigas del grupo de estudio.

.

13. Conclusiones Generales

En los apartados de las conclusiones para cada caso de estudio es posible leer como a partir de la comprensión de los fenómenos involucrados en el funcionamiento y aplicación de las distintas técnicas de análisis y los resultados de estas, a las que fue sometido el material. La comprensión de todos estos datos se puede resumir en todas las reflexiones que van de la mano del proceso de investigación en los diferentes aspectos que involucran casos como los presentados aquí.

La gestión y los trámites necesarios para la obtención de los permisos para los diagnósticos *in situ* y la donación del material para los análisis en laboratorio fue un camino largo en el cual se sortearon distintos obstáculos algunos burocráticos y otros ideológicos, que implicaron tiempo y paciencia. Cuando se anda por un lugar donde no hay camino abrir brecha siempre toma su esfuerzo, pero al final lo importante es no darse por vencidos y continuar.

Al principio de esta investigación surgieron tres preguntas y una hipótesis en donde la implementación de los Ensayos no Destructivos aplicados a la madera estructural permitiría la obtención de parámetros como, la Velocidad de onda Longitudinal y Transversal, el Módulo de Young y el Módulo de Corte y la Birrefringencia. Las preguntas que surgieron fueron las siguientes:

1. ¿Los análisis de madera a nivel laboratorio pueden ser aplicados *in situ* para el caso de nuestro país?

La respuesta a la pregunta número uno pudiera parecer sencilla y obvia de contestar con un simple sí, pero en este proceso se involucra una serie de trabajos previos y laboriosos. Para poder llegar a preguntarnos si estos estudios de laboratorio son aplicables o no, anteriormente fue necesario realizar una investigación previa sobre estos métodos aplicados a la madera de recuperación y a madera de reciente corta en este caso este trabajo doctoral es la continuidad de un estudio realizado durante la maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera (UMSNH), en la cual se observó un gran potencial de aplicación en casos reales. En ambas investigaciones se observó que estas técnicas pueden ser una medida detectora de daños bióticos, como medida predictora para la inspección y evaluación, *in situ* por medio del estudio del comportamiento de la madera estructural en uso (recuperación) y la de sustitución (reciente corta), frente a la transmisión de ondas ultrasónicas.

2. ¿Es posible la aplicación de métodos no destructivos en la madera estructural que permitan conocer su estado actual y el grado de seguridad que aun ofrecen?

Respondiendo a la segunda pregunta se puede decir que si es posible efectuar un análisis de diagnóstico preliminar de las edificaciones de carácter histórico con el equipo de campo para plantear de manera general las condiciones de la estructura de madera tanto de reciente corta como de la madera de recuperación y que estos resultados pueden ser corroborados con las mediciones en laboratorio para tener una mejor certeza de los datos se deben realizar muestreos en donde sea posible para su análisis en laboratorio, evitando la sustitución innecesaria de elementos originales de las estructuras de madera. Se obtuvieron resultados muy satisfactorios para ambas técnicas en los dos grupos de madera estructural.

3. ¿Pueden las técnicas de análisis no destructivas contribuir y mejorar la toma de decisiones previas a una intervención de restauración rehabilitación o de mantenimiento?

En el caso de la respuesta a la pregunta tres se comprobó que estas técnicas pueden ser parte complementaria del conjunto de medidas de actuación recomendadas para la conservación del patrimonio construido y pueden ser aplicadas directamente como alternativa de diagnóstico enfocadas a la restauración, rehabilitación y reparación de los elementos de madera estructural con el fin de salvaguardar el patrimonio conservando las tipologías y los sistemas constructivos propios de este tipo de arquitectura.

Los objetivos planteados en este trabajo de investigación permitieron desarrollar una metodología básica de actuación aplicable al diagnóstico del estado en el que se encontraban la madera estructural de recuperación de los tres casos de estudio, al momento previo a la rehabilitación y sustitución del material; en donde se aplicaron los métodos de ensayo no destructivo de emisión transmisión usando equipos portátiles, de fácil manejo y aptos para ser utilizados en piezas estructurales.

La primera fase de la inspección consistió en aplicar el método de inspección visual y para el primer diagnóstico, en donde se observaron las condiciones de humedad, los ataques biológicos y daños estructurales visibles (alabeos, rajaduras torsión etc.), en cada uno de los tres casos de estudio, para planificar la estrategia de muestre y medición. Con las medición de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas y de ultrasonido tanto *in situ* y en laboratorio se analizó la relación entre las velocidades ultrasónicas longitudinales y transversales según las direcciones principales de la madera.

Se efectuaron muestreos de los elementos estructurales para la identificación de especie (análisis anatómico) que contribuyo al cálculo de la densidad y se midieron los contenidos de humedad de las piezas de madera. Con todos los datos anteriores fue posible obtener una estimación del valor de las propiedades elásticas de la madera (de reciente corta y de recuperación) como el módulo de Young y del módulo de corte y se analizó el fenómeno de birrefringencia para ambos grupos de madera.

Para fortalecer y comparar los resultados de las técnicas no destructivas se aplicaron a las muestras de material de donación (en los casos donde se contaba con el suficiente material) una serie de técnicas destructivas poco invasivas como son el análisis anatómico en los cuales fue posible la identificación de características propias de la especie y la degradación de sus elementos constituyentes, relacionándolos con la forma de interacción de la velocidad de las ondas.

Para la caracterización básica química se determinó el pH, la holocelulosa, la lignina, los extraíbles y las sustancias inorgánicas presentes en la madera de recuperación y el efecto de estos elementos en sus propiedades físico-mecánicas a lo largo del proceso de degradación, esto permitió poder comparar la interacción de la velocidad de onda en el material y poder hacer un fechado mediante preliminar con el uso de ultrasonido.

Los ensayos físico-mecánicos ayudaron a la medición de la resistencia mecánica para su uso en madera estructural y poder comparar dichos resultados con los ensayos no destructivos. Estos parámetros contribuyeron a establecer criterios de sustitución refuerzo y reutilización de la madera de recuperación y de la de reciente corta.

Como se puede observar tanto la hipótesis propuesta en esta investigación como las preguntas que ayudaron a la formulación de esta, quedaron respondidas de forma satisfactoria en el cumplimiento de todos los objetivos tanto generales como particulares. Queda mucho trabajo por hacer en este campo y en los relacionados a esta actividad pasando por cuestiones de gobierno, económicas y sociales. Esta investigación es solo el inicio de un proceso largo para la creación de normativas y medidas de actuación en el campo de la conservación del patrimonio construido en México.

14. Referencias

- Agarwal, U. P., R. S. Reiner y S. A. Ralph (2010). Cellulose I Crystallinity Determination Using FTIR Spectroscopy: Univariate and Multivariate Methods. *Cellulose* 17(4) pp. 721-733.
- Agriculture, U. S. D. O., (2010). Wood Handbook, wood as Engineering Material. (Madison Wisconsin): (Forest Products Laboratory).
- Aguilar-Alcántara, M., Aguilar-Rodríguez, S. y Terrazas, T. (2014). Anatomía de la madera de doce especies de un bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México. *Madera y bosques*, 20, (3), pp. 69-86.
- Aguilera R., (2016). La Catedral de Morelia. Serie Cantera Rosa. (Textos Archivísticos) Colección V (Archivo Histórico Municipal de Morelia). 42 pp. 1-56.
- AIDIMA, s.f. Patologías de la madera y su tratamiento. *Símbolo de Calidad Blog material*. <http://blog.simbolocalidad.com/patologias-madera-tratamiento>.
- Alonso, M.J. (2001). La Conservación de los Bienes Culturales en Madera. Nuevas Orientaciones. En Cursos sobre el patrimonio histórico: Actas de los XI Cursos Monográficos sobre el Patrimonio Histórico, 17-21 de julio 2000, Reinosa, (José Manuel Iglesias Gil ed.), Universidad de Cantabria, Ayuntamiento de Reinosa, pp.143-450.
- Ambrose, J. (2002). *Análisis y Diseño de Estructuras*. (Limusa, S.A. de C.V.).
- Ambrose, J. (1998). *Análisis y Diseño de Estructuras*. (2 ed. Limusa).
- Andersen, H. R. M. R. R. S. (1981). Sputtering by Particle Bombardment I, H. Andersen, H.L. Bay,
- Andersson, S., Serimaa, R., Paakkari, T., Saranpaa P. y Pesonen E. (2003). Crystallinity of Wood and the Size of Cellulose Crystallites in Norway Spruce (*Picea abies*). *Journal of Wood Science* 49(6) pp. 531-537.
- Arangelovski, T., Gramatikov, K., y Docevska, M. (2015). Assessment of Damaged Timber Structures using Proof load Test. Experience from Case Studies. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1271-1277.
- Araújo Botelho, J. (2006). *Avaliação não Destrutiva da Capacidade Resistente de Estruturas de Madeira de Edifícios Antigos*. (Tesis doctoral inedita). Universidad de do Porto.
- Argüelles Álvarez, R.; Arriaga Martitegui, F. (1987). Normas de Cálculo de Estructuras de Madera. AITIM, *Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho*, Madrid.

- Argüelles Álvarez, R.; Arriaga Martitegui, F. (2000). Diseño y cálculo de estructuras de madera. 2ª ed. AITIM, *Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera*, Madrid.
- Ariza López, I. (2002). El Nuevo Enfoque en los Ensayos Mecánicos de la Madera Aserrada para Uso Estructural en la Normativa Europea. *Madera y Bosques*. Instituto de Ecología, A. C., (8), 002 (Otoño), pp.3-16.
- Ariza López, I. (2007). La Recuperación de las Estructuras de Madera. En La Casa Palacio Bertemati (1776-2006): Restauración y rehabilitación para sede del Obispado de Asidonia-Jerez. (F. Pinto Puerto coord.), Obispado de Asidonia-Jerez, Cajasur, Jerez de la Frontera, pp.181-196.
- Ariza López, I. (2008). Intervención en Forjados de Madera. *Diploma de Estudios Avanzados*. Universidad de Sevilla.
- Ariza López, I., Guerrero Vega, J. M., Pinto Puerto, F. (2016). Métodos de Trabajo y Resultados de Refuerzos en Madera de un Forjado del Siglo XVII de la Sacristía de San Miguel en Morón de la Frontera (Sevilla). *Informes de la Construcción*, 69(545): e180, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.16.041>.
- Ariza, F. J. y Ariza I. (2016): Datos BIM: Propuesta de Elementos de la Calidad y Método de Control, *GeoFocus* (Artículos), 17, p. 66-92. ISSN: 1578-5157
- Arriaga F.; Esteban, M.; Bobadilla, I. (2006). Inspección de Estructuras de Madera. Ejemplo de un Edificio en un Centro Urbano. *ReCoPaR. ETSA*, UPM, Depto. Construcción, (2) (junio), pp.24-36.
- Arriaga, F.; Peraza, F.; Esteban, M.; Bobadilla, I.; García, F. (2002). Intervención en Estructuras de Madera. *AITIM, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera*, Madrid.
- Askeland, D. R. Wrinht, Wendelin J. (2016). The science and Engineering or Materials. International Thomson Editores, 7th edition. ISBN:978-607-526-062-4.
- Avadhanulu, M. N. (1992). A Textbook of Engineering Physics. S. Chand Publishing. pp. 198-199. ISBN 8121908175.
- Ávila Calderón L. E. A., R. Q. (2014). Componentes Químicos de la Madera y la Corteza de *Haematoxylum brasiletto Karsten* (Leguminosae). *Maderas y Bosques*, 20(2), 153-158.

- Ávila Calderón, L.E.A. (2011). Evaluación de los Componentes Químicos básicos de la Madera de *Pinus pringlei* Infeccionada por el Muérdago *Psittacanthus macrantherus*. *Ciencia Nicolaita* 54:7-16.
- Ávila, L.E. y M.A. Herrera. (2012). Efecto de los Extraíbles y sus propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Madera y Bosques* 19(2), 2013 pp.21-35 33.
- Balaban, M. y N. Yilgör. 1995. The acidity of heartwoods and softwoods grown in Turkey. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 53:332.
- Baradit. (2013). *Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido* <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000019>.
- Barozzi, G., Cosentino, N., Lanzoni, L., y Tarantino, A. M. (2018). Safety assessment of Historic Timber Structural Elements. *Case Studies in Construction Materials*, 8, pp. 530-541.
- Basterra A., M. C. L. A. O. P. (2006). Técnicas de Ensayos no Destructivas en Madera Estructural mediante Extracción de Tornillos. pp. 1886-2497.
- Basterra B. G., A.; Casado, M.; Acuña, L. (2005). Análisis de Técnicas de Diagnóstico de Madera Estructural en Edificios existentes y propuesta de Integración orientada al Proyecto. En Actas de las I Jornadas de Investigación en Construcción, (1), días 2, 3 y 4 de junio de 2005. (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja), 17 p.
- Basterra, A., Relea Gangas, E. (2005). Estudio Comparativo del Comportamiento de Forjados mixtos Madera-Hormigon y su simulación Infografica por el MEF. En Actas de las I Jornadas de Investigación en Construcción, tomo 1, días 2, 3 y 4 de junio de 2005 (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja), 16.
- Basterra, A., M. C. (2006). Técnicas de Ensayos no Destructivas en Madera Estructural mediante Extracción de Tornillos. *Recopar*, pp.1886-2497.
- Basterra, L.A., Acuña, L., Casado, M.; Ramón-Cueto, G., López, G. (2009). Diagnostico y Análisis de Estructuras de Madera mediante Técnicas no Destructivas: aplicación La Plaza Mayor de Chinchón. (Madrid). *Informes de la Construcción*, (61), 516 (Octubre-diciembre), pp.9-35.
- Behrisch, R. M., Robinson, H.E. Roosendaal, R Sigmund, Springer-Verlag (1981). *Sputtering by Particle Bombardment I, H.Andersen, H.L.Bay, R.BehSpringer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Behrisch, R. (1981). *Sputtering by Particle bombardment. Springer, Berlín*.
-

- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A. Rutiaga-Quñones, J. G. (2013) Componentes Químicos de la Madera de Cinco especies de Pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, Instituto de Ecología, A.C. (19), 2, pp. 21-35
- Beyer, M.; Kranitz, K., Bremer, M.; Peters, J.; Fischer, S., Bues, C.T.; Niemz, P. (2018). Effect of Natural Aging on the Chemical Composition of Norway Spruce, Fir and European Oak Wood. *Pro Ligno* 14(2): pp.3-19.
- Biodiversidad.gob.mx, (2017)
biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/plantas/pinos/pinos.html.
- Blogs, A. (s.f.). La Conservación de Estructuras de Madera en el Patrimonio Histórico y Arquitectónico. <http://blog.simbolocalidad.com/patologias-madera-tratamiento>.
- Bodig, J. y B. A. Jayne (1993). Mechanics of wood and wood composites. *Malabar*, Florida (USA), Krieger Publishing Company.
- Branco, J. M., Sousa, H. S., y 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.
- Brashaw, B.K., Vatalaro, R.J., Wacker, J.P., Ross, R.J. (2005). Condition Assessment of Timber Bridges. Evaluation of several Stress-Wave Tools. *USDA*, (Department of Forest, Forst Products Laboratory), Madison.
- Bues, C. T. (1986). Investigations of some Properties of Fir and Spruce Wood After 17 years Water Storage. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 44(1), pp.7-15.
- Calicchio, D., Bernabei, M., Brunetti M., Crivellaro A., Macchioni N. y Pollini C. (2012). Diagnóstico Estructural de Estructuras de Madera Históricas: La sala diplomática del Palacio Real de Nápoles. 24, pp. 112-121.
- Capuz Lladró, R.; Díez Barra, R.; Botelho, J, Faria, J. (2006). Evaluación de la capacidad Resistente de Estructuras de Madera con la Utilización de Ensayos *in situ*. *PATRREB*. 2º encuentro sobre patología e Reabilitação dos Edifícios. FEUP, Porto, 20-21 de marzo 2006, (1), pp.139-148.
- Carlos, A. L. G. L. (2009). *Preparación de muestras para un microscopio electrónico de barrido* *Introducción a la Microscopia Electrónica*. s.l., s.n.
- Carrillo, M., Cruz L. J., Carreón H.(2018). *Mediciones de la Velocidad UltraSónica en Madera de Pino Sana y Deteriorada*. 15, p 356-362.

- Carrillo, M., Carreón, H. (2019 a). Ultrasonic Determination of the Elastic and Shear Modulus on Aged Wood. (SPIE) *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIII*, 10971(109711Z). doi:10.1117/12.2513294
- Carrillo, M., Sotomayor J., Raya. D (2019 b). Structural Analysis of Wood Beams by non-Destructive Methods in Restoration Works of the Cathedral of Morelia, Mexico. (C. 2. Symposium) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences CIPA International Symposium, XLII-2/W15*.
- Carrillo, M., Carreón, H. (2020). Determination of the Acoustic Anisotropy on a Recent and Aged Mexican pine wood by Ultrasound. (SPIE) *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation IX.*, 11380(113801J). doi:10.1117/12.2557085
- Carrillo, M., Carreón, H., Raya D. (2021). Determinación Ultrasonica de la Anisotropía Acústica en Madera Mexicana del Género *pinus* Sana y Deteriorada. *Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales*. (editores: E.A. Aguilar, E. Bedolla, C.A. León). Instituto de Investigación En Metalurgia y Materiales de la UMSNH Morelia, (18) pp. 314-323. ISSN 2448-6892
- Carrillo, M., Raya D., Ávila-Calderón, L.E.A. (2022). Los Componentes químicos de madera de pino deteriorada de tres vigas en zona de albura y duramen, pertenecientes al área de archivo del edificio de la Mitra de la ciudad de Morelia. *Madera y Bosques*. (aceptado para publicación 10 de junio 2022).
- Cartz, L. (n.d.). Ultrasonic testing. *Nondestructive Testing*, ASM International, *The materials information society*.
- Carvalho Cólilar, J., Hermoso Prieto, E., Díez Barra, R. (2009). Revisión del uso en España de los Ensayos no Destructivos sobre Madera Estructural (primera parte). AEND, *Asociación Española de Ensayos No Destructivos*, (499 (3er y 4º trimestre), pp.10-17.
- Carvalho Cólilar, J., Hermoso Prieto, E., Díez Barra, R. (2010). Revisión del uso en España de los ensayos no destructivos sobre madera estructural (segunda parte). AEND, *Asociación Española de Ensayos No Destructivos*, (50) (1er trimestre), pp.10-19.
- Castellanos, J. R. (2017). Densificado Higro-Termo-Mecánico de Madera de *Gyrocarpus americanus*. *Evaluación por ultrasonido*.

- Castillo, F. (1988). Propiedades Físicas y Mecánicas de Diez Especies Forestales de la Reserva Forestal “La Zarza” en la Provincia de Zamora Chinchipe. (Tesis Ing. For. Loja, Ecuador). *Universidad Nacional de Loja. Facultad de Ciencias Agrícolas. Escuela de Ingeniería Forestal*. 132p.
- Castillo, W. (2004). Propiedades Mecánicas del *Pinus patula* Schiede. Guatemala. *Universidad de San Carlos de Guatemala*.
- Capitel, A. (1992). Metamorfosis de monumentos y teorías de la restauración. Madrid: Alianza Editorial
- Cavalli, A., Bevilacqua, L., Capecchi, G., Cibecchini, D., Fioravanti, M., Goli, G., Togni, M., and Uzielli, L. (2016 a). MOE and MOR assessment of in Service and Dismantled Old Structural Timber. *Engineering Structures*, 125, pp. 294-299.
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., and Sousa H. S. (2016 b). A review on the Mechanical Properties of Aged Wood and Salvaged Timber. *Construction and Building Materials*, 114, pp. 681-687.
- Ceron C. M., A. M. A. y. S. R. L. (1999). Norma de Clasificación Visual para Maderas Latifoladas de uso Estructural. *Boletín Académico* (22) Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Cestari, C. B., Cestari, L., Corradino, G., Crivellano, A., Marzi, T., and Panosch, P. (2010). Hidden Architecture. Restoration of Historic Timber Structures: The Great Roof Structures of The Cathedral of Vercelli. *Structural Faults & Repair 2010*. 13th International Conference, Edinburgh. pp. 1-12.
- Chanfón Olmos, C. (1994). La Catedral de San Salvador, hoy Basílica. Pátzcuaro en relieve. Su tejido urbano. Arquitectura del Siglo XVI. Temas escogidos. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chanfón Olmos, C. (1996). Fundamentos Teóricos de la Restauración (3). México: UNAM/ Facultad de Arquitectura
- Chen W., Y. L. (2013). Microstructural Developmet of Hydrating Portland Cement Paste at Early Ages Investigated with non-Destructive Methodds and Numerical Simulation. *Journal of nondestructive evaluation*, 32, pp.228-237.
- Chen, Y., y Guo, W. (2017). Nondestructive Evaluation and Reliability Analysis for Determining the Mechanical Properties of Old Wood of Ancient Timber Structure. *BioResources*, 12(2), pp. 2310-2325.

- Chowdchury, K. A., R. D. Preston y R. K. White (1967). Structural Changes in Some Ancient Indian timbers. *Proc. Roy. Soc. B* 168: 148-157.
- Clausnitzer, K.-D. (1990). Historischer Holzschutz: zur Geschichte der Holzschutzmassnahmen von der Steinzeit bis ins 20. Jahrhundert. (Tesis Doctoral). Staufen bei Freiburg, University of Hannover.
- Clemente, P. (2018). Extending the lifespan of Cultural Heritage Structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(2), pp. 171-179.
- COFAN, C. (1999). *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. México D. F: Consejo nacional de la madera en la construcción, A. C. (COMACO).
- Consejo De Ministros Del Consejo De Europa (1993). *Carta del Europea del Patrimonio Arquitectónico*. Estrasburgo: Consejo de Europa. 352.
- Consejo De Europa (1985). *Convención para la Salvaguarda del Patrimonio Arquitectónico de Europa*. Granada: Consejo de Europa.
- Crespo Gutiérrez R., Edwin Jiménez R., Suatunce Cunuhay P., Law Blanco G. y Sánchez Fonseca C. (2008). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* l.f.) de Quevedo y Balzar. *Ciencia y Tecnología*. 1(2) 55-63.
- Croatto, G., and Turrini, U. (2014). Restoration of historical timber structures. Criteria, innovative solutions and case studies. In: Seminário *Intervir em construções existentes de madeira*. (P. B. Lourenço, J. M. Branco e H. S. Sousa). Gimaraes. pp. 119-136.
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., and Lourenço, P. B. (2015). Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9, pp. 277-289.
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Frank Rinn, F., and Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47, pp. 787-803.
- Dahle, G., Carpenter, A., and DeVallance, D. (2016). Non-Destructive Measurement of the Modulus of Elasticity of Wood Using Acoustical Stress Waves. *Arboriculture & Urban Forestry*, 42(4), pp. 227-233.
- Daniel F. Llana, G. Í.-G. M. E. E. H. a. F. A., (2020). Timber moisture content adjustment factors for nondestructive testing (NDT): Acoustic, Vibration and Proding Techniques. *De Gruyter*, 17 Diciembre.p. 11.
- Deppe, H. J. and H. Ruhl (1993). Evaluation of Historical Construction Timber. 1. Density and Compression Strength. (*Holz als Roh- und Werkstoff*) 51(6), pp.379-383.

- Desmarais, L. (1997). *Applied Electro Optics*. Pearson Education. pp.162-163. ISBN 0-13-244182-9.
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., and Winter, S. (2015). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2), pp. 115-127.
- Documento de Nara sobre autenticidad (2019). Conversaciones con Herb Stovel, Traducción Magar V., Rojas Vences M. y Peñuelas Guerrero G.(8), pp. 253 - 256
- Duque, M. d. P., (2004). Lecciones del concurso de puentes EIA. *Envigado*(1). Issue 1.
- Echenique Manrique R., R. F., (1993). *Mecanica de la madera. Textos Universitarios*.
- Entwistle, K. M. and A. Zadoroshnyj (2008). The recovery of Mechano-Sorptive creep Strains. *Journal of Materials Science*. 43(3), pp. 967-973.
- Erhardt, D., M. F. Mecklenburg, C. S. Tumosa and T. M. Olstad (1996). New versus old wood: Differences and Similarities in Physical, Mechanical, and Chemical Properties. International Council of Museums-Committee for Conservation 11th (Triennial Meeting. J. Bridgeland). London, James&James, pp. 903-910.
- Esteban Herrero, M., Arriaga Martitegui, F. (2001). Especificaciones de la Madera Aserrada para Uso Estructural. *Boletín AITIM*, (210) (marzo-abril), pp.49-56.
- Esteban Herrero, M., (2003). Determinación de la Capacidad Resistente de la Madera Estructural de Gran Escuadría y su Aplicación en Estructuras Existentes de Madera de Conífera. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Esteban Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R.; Arriaga Martitegui, F.; Íñiguez González, G.; Bobadilla Maldonado, I. (2007). *Informes de la Construcción*, (59), nº.506 (abril-junio), pp.15-27.
- Esteban Herrero, M., (2010). Intervención en Edificios con Estructura de Madera. Pautas generales. En IX curso de Estructuras de Madera: Inspección, Peritación y Consolidación,. *Colegio de Ingenieros de Montes de Madrid*, Madrid.
- Esteban, A. G. C. y L. G., (1988). Anatomía e Identificación de las Maderas de Coníferas Españolas. s.l.:*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes/Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho*.). 1, pp. 1-152
- Estructural, M. d. C. V. p. M., (1984). *PADT-REFORT*. Cartagena : Grupo Andino, Junta del Acuerdo de Cartagena.
- Fakopp. (2018). <http://fakopp.com/es/>. Retrieved junio 6, 2018

- Feio, A., y Machado, J. S. (2015). *In-situ* Assessment of Timber Structural Members: Combining Information from Visual strength Grading and NDT/SDT Methods. A review. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1157-1165.
- Fengel, D., and G. Wegener (1989). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. New York, Walter de Gruyter. Berlín. 613 p.
- Fengel, D. (1991). Aging and Fossilization of Wood and Its Components. *Wood Science and Technology* 25(3), pp. 153-177.
- Fernández, E. R. y. F., (1991). *Estructuras de madera*. 3 reimpresión ed. Balderas México: Limusa S. A. de C. V. .
- Fernández-Cabo, M. (1997). *Armaduras de cubierta*. Colegio Oficial de Arquitectos de León; (Ámbito Ed.), Valladolid.
- Fernandez-Golfin Juan I. , Rafael Díez, A. Gutierrez Oliva. (1996). Mechanical Characterization of Scots Pine sawn Wood from The Central and Iberian Systems using Structural size Specimens. *Investigación Agraria. Sistemas y recursos forestales* 6(1y2), pp.183-215.
- Fonseca M., M.R. (2006). Determinación de la Composición Química de la Madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) procedente de La Finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. (Tesis profesional). *Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala*. 125 p.
- Fridley, K. J., J. B. Mitchell, M. O. Hunt and J. F. Senft (1996). Effect of 85 years of service on Mechanical Properties of Timber Roof Members. Part 1: Experimental observations. *For Prod J*. 46(5), pp. 72-78.
- Fuentes S, M., (1990). *Apuntes para el curso de tecnología de la Madera I Serie de apoyo academico No. 33*, Chapingo México: Universidad Autonoma de Chapingo.
- Ghavidel, A., Scheglov, A., Karius, V. (2020). In-depth Studies on The Modifying Effects of Natural Ageing on the Chemical Structure of European Spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*) Woods. *J Wood Sci* 66, p.77. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01924-w>
- Giuliano, M. (2009). <https://es.slideshare.net/cjvial/diseo-madera>.
- Gnaedinger, S.(2017) <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/ameg/v44n2/html/v44n2a05.htm>
- Gómez de Cózar J. C., García-Martínez A., Ariza, I., Ruiz A. M.(2018). Life Cycle Assessment as a Decision-Making Tool for Selecting Building Systems in Heritage Intervention: Case

- study of Roman Theatre in Itálica, Spain. September. *Journal of Cleaner Production* 206. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.169
- González Moreno-Navarro, A.(1997).Mantener lo restaurado. Loggia, Arquitectura y Restauración, (S.l.), n. 4, p. 20-21, ISSN 1136 758X.
<https://polipapers.upv.es/index.php/loggia/article/view/53712021>
[doi:https://doi.org/10.4995/loggia.1997.5371](https://doi.org/10.4995/loggia.1997.5371).
- González Pimentel, M.R. (2005). Determinación de la Composición Química de la Madera del Pino Ocote (*Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl*) procedente de Plantación en Cucanjá, Tukurú, Alta Verapaz. (Tesis profesional). Escuela de Ingeniería Química. *Universidad de San Carlos de Guatemala*. 110 p.
- González, M. E. (2006). Estudio y proyecto para la Plaza Mayor de Morelia, Trazo, proporción y símbolo en el Arte Virreinal Morelia, UNAM Gobierno del Estado de Michoacán, pp. 375.
- Green, D. W. J. K. D., (1999). *Mechanical properties of wood forest products laboratory*. U.S. Madison, WI: s.n.
- He, P. (1998). Dermination of Ultrasonic Parametersbased on Attenuation and Dispersion Measurements. *Ultrasonic imaging*, 20, pp.275-285.
- Hedges, J. I. (1989). The Chemistry of Archaeological Wood. Archaeological Wood Properties, Chemistry, and Preservation. R. Rowell and R. J. Barbour. Washington DC, American Chemical Society. 225, pp. 111-140.
- Hedges, J. R. Y. B. J., (1990). The Chemistry of Archaeological Wood. *The Archaeological Wood: Propertiers, Chemistry and Preservation*.
- Henriques, D. F. y Neves, A. S. (2015). Semi-destructive *in situ* Tests as Support to The Assessment of a Conservation Process. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1253-1258.
- Herbst, S. G.y.R. (2017) <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/ameg/v43n1/html/v43n1a10.htm>.
- Hermoso Prieto, E.; Fernández-Golfín Seco, J.I.; Diez Barra, R.; Mier Pérez, R. (2007). Aplicación de los Ultrasonidos a la Evaluación de las Propiedades Mecánicas de la Madera en Rollo de Pequeño Diámetro. *Informes de la construcción*, 59, (506), pp.87-95.
- Herrero, M. E., Arguelles Álvarez, R., Arriaga Martitegui, F., Íñiguez González, G. y Bobadilla Mldonado, I. (2007). *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*. (59). España.
-

- Hiriart, C. A. (2013). *Gestión del Turismo Cultural en Michoacán y sus impactos en el patrimonio monumental de Morelia y Pátzcuaro*. Comisión de Turismo, Comisión de Desarrollo Urbano, Obra Pública y Vivienda. H. Ayuntamiento De Morelia, Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo Facultad De Arquitectura. Colegio de Arquitectos de Michoacán A.C. More Valladolid, (607-424), (1) 386p. ISBN: 978-607-424-422-9
- Hiriart, C. A. (2022). The Temple of Santiago Apostle in Nuria (Michoacán, Mexico): Risk management as a resilience tool for the conservation of religious heritage. In Olimpia, *Regenerating Cultural Religious Heritag. Intercultural Dialogue on Places of Religion and Rituals*. Springer Edit. Singapore.
- Hoadley, R. B. (2000). *Understanding Wood: a craftsman's guide to wood Technology*. United States of America: The Taunton Press.
- Hoffmann, P., and M. A. Jones (1990). Structure and Degradation Process for Waterlogged Archaeological Wood. *Archaeological Wood Properties, Chemistry, and Preservation*. (R. Rowell and R. J. Barbour). Washington DC. 225, pp. 35-65.
- Hunt, D. G. (1986). The Mechano-Sorptive creep Susceptibility of 2 Softwoods and its Relation to some other Materials Properties. *Journal of Materials Science* 21(6) pp. 2088-2096.
- ICOMOS (1999). Principios que deben regir la conservación de las estructuras históricas en madera. Documento ratificado por la 12 Asamblea General del ICOMOS celebrada en México del 17 al 24 de octubre de 1999. www.esicomos.org, ICOMOS. 12, p.1-6.
- ICOMOS (2003). Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del Patrimonio Arquitectónico. Ratificada por la 14ª Asamblea General del ICOMOS, Victoria Falls, Zimbabwe, octubre 2003. www.esicomos.org, ICOMOS.
- ICOMOS (2004). Recomendaciones para el análisis, conservación y restauración estructural del Patrimonio Arquitectónico. (Agnes González Dalmau, traductora; J. L. González Moreno-Navarro y P. Roca Fabregat, revisores). Edición para el XXVII Cursillo de Intervención en el Patrimonio Arquitectónico del Colegio de Arquitectos de Cataluña, 16-19 de diciembre de 2004, Barcelona. www.esicomos.org, ICOMOS.
- ICOMOS (2017). Principios para la Conservación del Patrimonio construido en madera. Ratificada por la 19ª Asamblea General en Delhi, India, Diciembre 2017.
- 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.
- Instituto de Investigaciones, s. R. (1995). *Ciencia y Tecnología de la Madera*. Xalapa (Veracruz)
- Jaramillo, F., Ontaneda, G. (1989). Estudio de las Características Tecnológicas, Trabajabilidad y usos de la Especie Forestal *Pollalesta Karstenii*, Pigüe. (Tesis. Ing. For. Loja, Ecuador). Universidad Nacional de Loja. *Facultad de Ciencias Agrícolas. Escuela de Ingeniería Forestal*. 142p. ean-Luc
- Jean-Luc Sandoz, Y. B. (2006). Acousto-Ultrasonic Non-Destructive Evaluation of Historical Wooden Structure. (P. R. Lourenço, Ed.) *Structural Analysis of Historical Constructions*.
- Jiménez Martín, A. (1997). Enmiendas Parciales a la Teoría del Restauro (I): Imágenes y Palabras. *Loggia: Arquitectura y restauración*, (4), pp.10-19.
- Johnston, D. (1983). *La Madera Clases y Características*. Barcelona: CEAC.
- Jorge Carballo Collar, E. H. (2009). Ensayos no Destructivos sobre Madera Estructural. Una revisión de 30 años en España. *Kurú, Revista Forestal*, 17.
- Justo José Barañao, E. A. P. E. C. E. C. P. D. F. (2008). *Manual para la identificación de maderas con aumentos de hasta 10X*, Luján: s.n.
- Kasal, B., and Tannert, T. 2010. *In Situ Assessment of Structural Timber*. State of the Art Report of the RILEM. Technical Committee 215-AST. (Springer, Heidelberg, Germany).
- Katalin Kránitz, M. D. (2013). Determination of Dynamic Elastic Moduli and Shear Moduli of Aged Wood by Means of Ultrasonic Evices-. *RILEM*, 47.
- Kloiber, M., Drdácký, M., Machado, J. S., Piazza, M., and Yamaguchi, N. (2015). Prediction of Mechanical Properties by Means of Semi-Destructive Methods: A review. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1215-1234.
- Koehl, M., Viale, A., and Reeb, S. (2013). A Historical Timber Frame Model for Diagnosis and Documentation before Building Restoration. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, (II-2/W1), ISPRS 8th 3D GeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, Istanbul. pp. 201-212.
- Kohara, J. (1955). Studies on the permanence of wood (X): Colorimetry on the Old Timbers by the Trichromatic Colorimeter. *Journal of the Japanese Forestry Society* 37(2) pp. 63-66.
- Kohara, J. y H. Okamoto (1955). Studies of Japanese old timbers. *Sci Rep Saikyo Univ* 7 pp. 9-20.

- Kollmann, F. y Schmidt, E. (1962). Gefügezerrüttung und Festigkeitseinbusse von dauerbeanspruchtem Nadelholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 20(9) pp.333-338.
- Kollmann, F. (1999). *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y el Servicio de la Madera de Agricultura.
- Kránitz K., Markus D., Niemz P. 2013. Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic evices. *RILEM*, pp. 47.
- Kránitz, K., Deublein, M., and Niemz, P. (2014). Determination of Dynamic Elastic Moduli and Shear Moduli of Aged Wood by Means of Ultrasonic Devices. *Materials and Structures*, 47, pp. 925-936.
- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T.y Niemz, P. (2016). Effects of Aging on Wood: A Literature Review. *Wood Science and Technology*, 50, (1), pp.7-22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>.
- Krautkramer, J. (1990). *Physical principles of ultrasonic testing of materials* (4 th fully resvised edition ed.). (U. t. materials, Ed.)
- Kuo, M. L. and N. H. Hu (1991). Ultrastructural Changes of Photodegradation of Wood Surfaces Exposed to UV. *Holzforschung* 45(5), pp. 347-353.
- Lahr, F. C. A. P. T. S. D. G. D.O. (2014). Anisotropy Influence in Obtaining Stiffness Property bending of Brazilian Wood Species. *Int. J. Mater. Eng.*, 4(3), pp. 92-96.
- Landa Esparza, M. (1999). Nuevas Técnicas de Reparación de Estructuras de Madera. Elementos flexionados. Aporte de madera unión encolada II. Metodología de puesta en obra. *Revista de edificación*, (29), pp.30-36.
- Le Tiec, A. Novak, J. (2016). Theory of Gravitational Waves. An Overview of Gravitational Waves. pp. 1-41. ISBN 978-981-314-175 9. arXiv:1607.04202. doi:10.1142/9789813141766_0001.
- Li, X., Dai, J., Qian, W., and Chang, L. (2015). Prediction of Internal Defect Area in Wooden Components by Stress Wave Velocity Analysis. *BioResources*, 10(3), pp. 4167-4177.
- Lipson, Stephen G.; Lipson, H.; Tannhauser, Stefan D. (1995). *Optical Physics*. Cambridge University Press. pp. 125-127. ISBN 978-0-521-43631-1.
- Lobillo, I.; Villegas, L. (2006). Metodologías no Destructivas Aplicadas a la Rehabilitación Estructural del Patrimonio. En REHABEND, 1ª Jornada Técnica Nacional sobre metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido, 11

- noviembre 2006, Comillas, 26 págs. Universidad de Cantabria, GTED-UC. En: <http://grupos.unican.es/GTED/archivos>, Universidad de Cantabria.
- Lombillo, I.; Villegas, I.; Silió, D.; Hoppe, C.; GTED-UC, (2008). Evaluación no Destructiva del Patrimonio Construido. *Revista Internacional Construlink*, (6), 16, pp.40-53.
- Luis García Esteban, P. d. P. d. P. A. G. A. L. G. E. L. D. L. G. F. Y. R. L. I. B. M. F. F. G. A. C. A., (2002). Anatomía e Identificación de Maderas de Coníferas a Nivel Especie. Primera ed. Madrid: *Mundi Prensa*.
- Machado, J. S., Lourenço, P. B., and Palma, P. (2011). Assessment of The Structural Properties of Timber Members *in situ*. A probabilistic approach. SHATIS 11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. Lisbon. pp. 1-12.
- Maderas, P. d. I. (2014). <https://es.scribd.com/document/225951953/Propiedades-de-La-Madera>.
- Mantilla Carrasco, E.V; Rocha Teixeira, A.; Pirez Acevedo, A.; Morerira, L.E. (2009). Metodología para el Análisis de la Integridad de Estructuras Históricas de Madera Afectadas por Insectos Xilófagos por medio del Ultrasonido. *Kurú, Forestal*, Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela de Ingeniería Forestal, (16), pp.6 9.
- Martines, M. (1948). *Los pinos Mexicanos*. segunda ed. México: s.n.
- Martínez, I., y Vignote, S. (2005). Tecnología de la Madera. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Messer, O. (2007). Comportamiento en flexión de vigas laminadas que incorporan *Pino oregón*.
- Matikas, S. I. R. a. T. E. (1996). Ultrasonic Characterization of Surfaces and Interphases. *MRS Bulletin*, pp. 22-29.
- McGovern, M. (2011). Effect of Decay on Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements in Wood. (D. o. Engineering, Ed.) *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*, Marzo, (7981), p. 13.
- Milch, J., Tippner, J., Sebera, V., Kunecký, J., Kloiberb, M., and Navrátila, M. (2016). The numerical Assessment of a Full-Scale Historical truss Structure Reconstructed with Use of Traditional All-Wooden Joints. *Journal of Cultural Heritage*, 21, pp. 759-766.
- monumentos, C. i. (1964). Carta internacional sobre la conservación de monumentos y sitios . *II Congreso internacional de arquitectos y técnicos de monumentos históricos, Venecia 1964*, p. 4.

- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C. y Rubio de Hita, P. (2014). Use of Ultrasound as a Nondestructive Evaluation Technique for Sustainable Interventions on Wooden Structures. *Building and Environment*, 82, pp. 247-257.
- Morales Conde, M. J. y Machado, J. S. (2017). Evaluation of cross-sectional Variation of Timber bending Modulus of Elasticity by Stress Waves. *Construction and Building Materials*, 134, pp. 617-625.
- Moreno, T. G. (2010). *Instructivos de Prácticas de Anatomía de la Madera 1*, Morelia: Universidad Michoacána de San Nicolas de Hidalgo.
- Mott, R. (2009). Resistencia de materiales (Quinta Edición ed.). University of Dayton.
- Munafò, P., Stazi, F., Tassi, C., and Davì, F. (2015). Experimentation on Historic Timber Trusses to Identify repair Techniques Compliant with the Original Structural–Constructive Conception. *Construction and Building Materials*, 87, pp. 54-66.
- Muncaster, R. (1993). A-level Physics. Nelson Thornes. pp. 465-467. ISBN 0-7487-1584-3.
- Nagy, P. B. (1999). *Introduction to Ultrasonic*. University of Cincinnati.
- Nagy, P. B. (1999). The role of acoustics in characterizing porous media. *Experimental methods in the physical sciences*, 35, pp.161-215.
- Niemz, P. (1993). Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen, DRW-Verlag, 243.
- Nilsson, T. and G. Daniel (1990). Structure and the Aging Process of Dry Archaeological Wood. *Advances in Chemistry* (225), pp. 67-86.
- Norrstrom, H. (1969). Light Absorbing Properties of Pulp and Pulp Components. 1. *Method. Svensk Papperstidning-Nordisk Cellulosa* 72(2), pp. 25-31.
- Nuere Matauco, E. (2007). Madera en Restauración y Rehabilitación. *Nota técnica. Informes de la Construcción*, (59), 506, pp.123-130.
- Ongaretto, E., Pozza, L., and Savoia, M. (2016). Wood-based solutions to Improve Quality and Safety against Seismic Events in Conservation of Historical Buildings. *International Journal for Quality Research*, 10(1), pp. 17-46.
- Osuna-Sequera, C., Llana, DF, Íñiguez-González, G., & Arriaga, F. (2020). La influencia de la variación de la sección transversal en la evaluación de la rigidez a la flexión en estructuras de madera existentes. *Estructuras de ingeniería* ,204 , 110082.
- Peraza Oramas, C.; Alares Martín, J.M.; Guindeo Casasús, A. (1990). Estructuras de Madera. (César Peraza Oramas coord.). Fundación Escuela de la Edificación, Madrid.

- Pérez Martín, L., Úbeda de Mingo, P., Fernández Álvarez, S. (1994). Restauración y Rehabilitación. Ud. 1. Fundación Escuela de la Edificación, Getafe.
- Pérez-Coello, M. S., J. Sanz and M. D. Cabezudo (1998). Gas Chromatographic mass Spectrometric Analysis of Volatile Compounds in Oak Wood used for Ageing of Wines and Spirits. *Chromatographia* 47(7-8), pp. 427-432.
- Pérez de Cuellar, J. (Coord.) (1997). Nuestra Diversidad Cultural. *Informe de la Comisión Mundial de Cultura y Desarrollo*. México: Correo de la UNESCO.
- Petroff, G. D. N. (1968). *The correlation between the physical and mechanical properties of paper and dimensional characteristics of fiber*. s.l., s.n.
- Poblete, H. y E. Roffael. (2004). Acidez de la Corteza de algunas Especies Nativas Chilenas. *Bosque* 25(3), pp.73-78.
- Poblete, H., Rodríguez, S. y Zárata, M. (1991). Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima. Publicación docente núm. 34. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 51 p.
- Popp, F. B. a. K. (1990). Mechanisms of ultrasonic attenuation in a bainite low-alloy steel. *Scripta metallurgica et materialia*, 24, pp.1357-1362.
- Pytel y Singer. (2008). Resistencia de Materiales (Cuarta ed.). Oxford University.
- Ramos-Pantaleón, D., L.E.A. Ávila-Calderón, H.G. OchoaRuíz y J.G. Rutiaga-Quiñones. (2011). Contenido de Sustancias Extraíbles en la Madera de *Enterolobium*. P.158
- Raposo, P. C., Correia, J. A. F. O., Sousa, D., Salavessa, M. E. Reis, C., Oliveira, C., y De Jesus, A. (2017). Mechanical Properties of Wood Construction Materials from a Building from the 19th Century. *Procedia Structural Integrity*, 5, pp. 1097-1101.
- Rede, V. E. S. Š. Z. (2017). Effects of Microstructural Orientation on the Abrasive wear Resistance of Subfossil Wood in Three Orthogonal Planes. *Wear*, Issue 380, pp. 1-5.
- Revilla González, E. (2011). Química de la Madera de Cuatro Pinos Mexicanos de la subsección Cembroides. (Tesis profesional). Programa académico de Ingeniero Forestal Industrial. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- 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.

- Rivero, J. (2004). Propiedades Físico-Mecánicas de *Gmelina arborea* Roxb y *Tectona grandis* Linn. *F. Bo. Metodología*. <http://www.monografias.com/trabajos16/gmelina-arborea/gmelina-arborea.shtml#top>
- Rivero-Cruz, J.F. (2008). Antimicrobial Compounds Isolated from *Haematoxylon* Brasiletto. *Journal of Ethnopharmacology* 119(1,2), pp.99–103.
- Robert. E., G. J. (n.d.). *Introduction to ultrasonic testing*. Columbus, Hoio: Contemporary nondestructive testing.
- Rodríguez Liñán, C.; Rubio de Hita, P. (1995). Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos y obtención de parámetros resistentes. (C. Rodríguez Liñán, P. Rubio de Hita). *Informes de la Construcción*, (47), 440 (noviembre/diciembre), pp.5-22.
- Rodríguez Liñán, C.; Rubio de Hita, P.; Gómez de Cózar, J.C.; Pérez Gálvez, F. (2004). Diagnóstico Mediante Técnicas de Ultrasonidos del Forjado de Madera del Refectorio del Convento de Santa Clara en Carmona (Sevilla). *Informes de la Construcción*, (55), 490 (marzo-abril), pp.17-28.
- Rodríguez V. (1998). Variación del Largo de Traqueidas Dentro y Entre Árboles de *Pinus rudis* Endl. en Sierra las Alazanas, Arteaga, Coahuila. (Tesis profesional). Buenavista (Saltillo): Coahuila Universidad Autónoma (Agraria Antonio Narro). 52 p.
- Rodríguez, L. M. E. (2005). Determinación de los Componentes Químicos de la Madera de Pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl.) proveniente de La Finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango. (Tesis profesional). *Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala*. 90 p.
- Rodríguez-Moreno C., J. F. Reinoso-Gordo, E. Rivas-López, A. Gómez-Blanco, F. J. Ariza-López & I. Ariza-López (2016). From point Cloud to BIM: an Integrated Workflow for Documentation, Research and Modelling of Architectural Heritage, *Survey Review*, DOI: 10.1080/00396265.2016.1259719
- Rowell, R., ed. (1984). *The Chemistry of Solid Wood*. American Chemical Society. *Advances in chemistry*. Washington. D.C. 614 p
- Rowell, R. (2005). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. (Taylor & Francis). United States of America. 473 p.

- Rubio de Hita, P. (2000). Evaluación del Estado de la Madera, en Obras de Rehabilitación, mediante Técnicas de Ultrasonidos. Universidad de Sevilla: *Servicio de Publicaciones, Sevilla*.
- Rutiaga Q., J.G., F.E. Pedraza Bucio y P. López Albarrán. (2010). Componentes Químicos Principales de la Madera de *Dalbergia granadillo Pittier* y de *Platymiscium lasiocarpum Sandw. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16(2), pp.179-186.
- Rutiaga Quiñones, J.G. (2001). Chemische und Biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen. Buchverlag Gräefelfing. München. 201 S
- Salas, T. (2013). <https://es.slideshare.net/correovenymira/manual-de-construccin-de-viviendas-en-madera>.
- Salonikios, T., Theodoulidis, N., Morfidis, K., Zacharopoulou, G. y Raptis, K. (2018). Efficiency Investigation of Structural Interventions based on *in situ* Ambient Vibration Measurements on Acheiropoietos Early Byzantine Basilica, Thessaloniki, Greece. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(1), pp. 135-149.
- Sandermann, W.; Rothkamm, M. (1959): Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz Roh-Werkst.* 17, pp.S.433– 440.
- Sandoz, J. (2006 a). Nodestructive Evaluation of Buildintimer by Ultrasound. Vancouver, Washigton: International symposium on nondestructive testing of wood.
- Sandoz, Y. B. (2006 b). Acousto-Ultrasonic Non-Destructive Evaluation of Historical Wooden Structure. *Structural Analysis of Historical Constructions*. 279055339.
- Sandoz, J.L.; Benoit, Y. (2007). Timber Grading Machine using Ultrasonic and Density Measurements. COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products, (Robert Kliger, coord.), 15 al 17 de octubre, Varsovia, pp.167-173.
- Sasaki, Y., Yamasaki, M., Uchida, M. y Torichigai, T. (2014). Non-destructive Stress Evaluation of Wood Members in Japanese Traditional Building. 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, pp. 1-8.
- Schenzel, K., S. Fischer and E. Brendler (2005). New method for determining the degree of cellulose I crystallinity by means of FT Raman spectroscopy. *Cellulose* 12(3), pp. 223-231.
- Shipman, J.; Wilson, J. D.; Higgins, Charles A (2015). *An Introduction to Physical Science*, 14th Ed.. Cengage Learning. p. 187. 187. ISBN 978-1-305-54467-3.

- Singh, D. (2015). *Fundamentals of Optics*, 2nd Ed.. PHI Learning Pvt. Ltd. p. 453. ISBN 978-8120351462.
- Smith, I., E. Landis y M. Gong (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. Ohn Wiley and sons Chichester, Inglaterra, pp. 234-242.
- Sonderegger, W. K. K. B. C. N. P., (s.f.) *Aging Effects on Physical and Mechanical Properties of Spruce*.
- Sousa, H. S., Machado, J. S., Branco, J. M. y Lourenço, P. B. (2015). Onsite assessment of Structural Timber by Means of Hierarchical Models and Probabilistic Methods. *Construction and Building Materials*, 101(2), pp. 1188-1196.
- Sousa, H. S., Branco, J. M. y Lourenço, P. B. (2016). A holistic Methodology for Probabilistic safety Assessment of Timber Elements Combining Onsite and Laboratory Data. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(5), pp. 526-538.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., Machado, J. S. y Lourenço, P. B. (2017). Predicting Mechanical Properties of Timber Elements by Regression Analysis Considering Multicollinearity of Non-Destructive Test Results. SHATIS'17 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. Istanbul, Turkey. pp. 1-9.
- Stamm, A. J. (1964). *Wood and Cellulose Science*. New York, USA, Ronald Press, 549.
- Ultrasound, M. o. E. C, (2001).
- Unger, A., A. P. Schniewind and W. Unger (2001). *Conservation of Wood Artifacts*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 578 p.
- Unterwieser, H. y Schickhofer, G. (2010). Influence of Moisture Content of Wood on sound Velocity and Dynamic MOE of Natural Frequency and Ultrasonic Runtime Measurement. *European Journal of Forest Products*, 69(2), pp. 171-181.
- Uzun, Z., Köse, C. y Köse, N. (2017). A Multidisciplinary Study to reveal the Historical Value of Wooden Structures and to Develop a Conservation Approach: Dere and Karlı Mosques in Samsun, Turkey. *Journal of Cultural Heritage*, In Press.
- Tampone, G., and Ruggieri, N. (2016). State-of-the-art Technology on Conservation of Ancient Roofs with Timber Structure. *Journal of Cultural Heritage*, 22, pp. 1019-1027.
- Téllez S., C. H.-R.-D.-Q. (2010). Componentes Químicos del Duramen de *Andira inermis* (W. Wright) DC. (Leguminosae). *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambientales*, 16(1), pp.87-93.

- Tolvaj, L. and S. Molnár (2008). Photodegradation and Thermal Degradation of Outdoor Wood. Wood Science for Preservation of Cultural Heritage: Mechanical and Biological Factors. J. Gril. Braga, Portugal, pp. 67-72.
- Toratti, T. (1992). Creep of Timber Beams in a Variable Environment. (Tesis Doctoral). Espoo, Finland, Helsinki University of Technology.
- Tovar, M. C. Y. I. F. D. D. C. T. M. C. Y. I. F., (1995). Insectos Forestales de México. Universidad Autonoma de Chapingo.
- Tumero, P. (2010). <http://www.monografias.com/docs110/elasticidad-materiales-solidos/elasticidad-materiales-solidos.shtml>.
- UNESCO (2001, noviembre). Declaración Universal de la UNESCO sobre la Diversidad Cultural. Adoptada en la XXXI Conferencia General. París.
- Vázquez G. Y., L. I. (2010). Posibilidades de uso de 98 maderas para el Proceso de Pulpeo Kraft, con base a sus Índices de Calidad de Pulpa. Ciencia Nicolaíta, 52, pp.87-102.
- Vázquez, (2015). Determination of the Mechanical properties of Castanea sativa mill. Using Ultrasonic wave Propagation and Comparison with Static Compression and Bending Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (49).
- Villaseñor-Araiza, J. C., Rutiaga-Quiñones, J. G. (2000). La madera de Casuarina Equisetifolia L., Química e Índices de Calidad de Pulpa. Madera y Bosques 6(1): pp.29-40.
- Viña, F. (1997). La madera como Material de Expresión Plástica. Análisis estructural y tratamiento en escultura para Interior y Exterior. España: Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales. Universidad de La Laguna.
- W. Chen, Y. L. P. S. Z. S. (2013). Microstructural Development of Hydrating Portland Cement paste at Early Ages Investigated with Non-Destructive Methods and Numerical Simulation. Journal of Nondestructive Evaluation, (32), pp. 228-237.
- Waldman, G. (2002). *Introduction to Light: The Physics of Light, Vision, and Color*. Courier Corporation. pp.79-80. ISBN 978-0-486-42118-6.
- Walsh-Korb, Z., Avérous, L. (2018). Recent Developments in the Conservation of Materials Properties of Historical Wood. Progress in Materials Science, In press.
- Wilcox, W. (1988). Detection of Early Stages of Wood decay with Ultrasonic Pulse Velocity. *Forest products Journal*, (XXXVII), 5 pp.68-73
- William F. Smith, J. H. (2006). Fundamentos de la Ciencia y la Ingeniería de los Materiales. Cuarta ed. s.l. Mc Graw Hill.

- Wise, (1946). Determinación de Holocelulosa. Método usual Wise. In. 1992. Instituto de Madera, Celulosa y Papel. Ing. Karl Augustin Grellmann. Universidad de Guadalajara. Traducción por el Departamento de Tecnología Química de la Madera p.p 20-22.
- Yasutoshi S., H. M. (2007). Effect of Anisotropy on Acoustoelastic Birefringence in Wood. *Ultrasonics*, 2(46), pp. 84-190.
- Yamasaki, M., Sasaki, Y. and Iijima, Y. J. (2010). Determining Young's Modulus of Timber on the Basis of a Strength Database and Stress Wave Propagation Velocity II: Effect of the Reference Distribution Database on the Determination. *Journal of Wood Science*, 56(5), pp. 380-386.
- Yoshimoto, T. (1972). Photochemical Analysis of Wood and Related Sunstances. *J. Japan Wood Res. Soc.* 18,1: 45-49.
- Yu, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z., and Fang, Y. (2017). R&R Study of Sing a Stress wave Timer to Measure the Elastic Modulus of Structural Dimension Lumber. *Measurement*, 95, pp. 293-296.
- Zhang, J., Xu, Q., Xu, Y., and Zhang, M. (2015). Research on Residual Bending capacities of used Wood Members Based on the Correlation Between Non-Destructive Testing Results and the Mechanical Properties of Wood. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16(7), pp. 541-550.
- Zobel, B. J. and J. P. van Buijtenen (1989). *Wood Variation: Its Causes and Control*. Berlin, Germany, *Springer Verlag*.
- Zanchetta, C., Croatto, G., Paparella, R., & Turrini, U. (2014). Performance based Building Design to Ensure Building Quality: from Standardization to LEAN Construction. *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, (8), pp.62-69. <https://doi.org/10.13128/Techne-15061>
- Zhang, J., Xu, Q., Xu, Y., and Zhang, M. (2015). Research on Residual Bending capacities of used Wood members Based on the Correlation Between Non-Destructive Testing Results and the Mechanical Properties of Wood. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16(7), pp. 541-550.

15. Normas y estándares

- ASTM. (2012). D 143: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohoken, Pennsylvania. ASTM. (2012). D 5055: Standard Specification for Establishing and Monitoring Structural Capacities of Prefabricated Wood I-Joists. West Conshohocken, Pennsylvania. Barrios, E., Contreras, W., Owen, M., Sosa, M., & Styles, W. (2012). Ensayos mecánicos de vigas compuestas de madera tipo I: LS&E-1 para uso estructural. Caracas: Revista Forestal Venezolana.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 1996 Annual Book of ASTM Standards. Section 4 Construction. Volume 04.10 Wood. Pennsylvania, United States. P. 23-39, 556-559.
- Código Técnico de la Edificación (CTE). Ministerio de la Vivienda, Madrid. En: <http://www.fomento.gob.es> (último acceso 2021.03).
- DIN 4074 Parte-1:2003. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz. Beuth Verlag, Berlin.
- EHE-08, 2008. Instrucción del hormigón estructural. Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, Madrid.
- NBE-EM, 1999. Norma Básica de la Edificación: Estructuras de Madera (documento provisional). Ministerio de Fomento, documento no editado, Madrid.
- UNE 41.805 IN (varios años). Diagnóstico de edificios. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE 56.528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos. Instituto Nacional de Racionalización y Normalización, Madrid.
- UNE 56.544:2007. Clasificación visual de madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE 66.060:1982. Interpretación estadística de datos. Eficacia de las pruebas relativas a medias y varianzas. Instituto Nacional de Racionalización y Normalización, Madrid.
- UNE-CEN/TS 12.169 EX, 2009. Criterios para la evaluación de la conformidad de un lote de madera aserrada. Norma experimental. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 301:2007. Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento. Asociación Española de Normalización, Madrid.

- UNE-EN 338:2009. Madera estructural. Clases resistentes. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 350-2:1995. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa. Asociación Española de Normalización, Madrid
- UNE-EN 351-1:2008. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los productos protectores. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 380:1998. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Principios generales para los ensayos de carga estática. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 384:2004. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 408:2010. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 1912:2005(2009). Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-EN 1997-1:2010. Euro código 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales. Asociación Española de Normalización, Madrid. UNE-ENV 1995-1-1:2006. Euro código 5. Proyecto de estructuras. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-ENV 1995-1-2:1999. Euro código 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2: reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego. Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNE-ISO 2859-1:2012. Procedimientos de muestreo para la inspección por atributos. Parte 1: Planes de muestreo para las inspecciones lote por lote, tabulados según el nivel de calidad aceptable (NCA). Asociación Española de Normalización, Madrid.
- UNI 11.118:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Criteri per l'identificazione delle specie legnose. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milán, Italia

UNI 11.119:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milán, Italia.

UNI 11.130:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Terminologia del degradamento del legno. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milán, Italia.

UNI 11.138:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milán, Italia.

Z-9.1-680. 2012/11/23. Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlín, Alem.

Glosario

Análisis anatómico de la madera; Se trata de analizar la estructura de la madera, tanto a nivel macroscópico como microscópico, es siempre el primer paso en cualquier identificación y permite evaluar rápidamente de qué posibles especies puede proceder la madera. A nivel microscópico analiza la estructura interna de la madera y siempre se tiene que realizar en laboratorio. Permite identificar el género y, en ocasiones, también llega a nivel de especie. La muestra pasa por un proceso de reblandecimiento, corte de láminas, tinción, observación mediante microscopio y comparación de los resultados con claves anatómicas y colecciones de referencia (identificación de características propias de la especie y la degradación de sus elementos constituyentes).

Anisotropía de la madera; es la propiedad general de la madera la cual presenta diferentes características según la dirección debido a su estructura atómica y molecular regular que produce diferentes comportamientos físicos y mecánicos a lo largo de tres direcciones diferentes: axial, radial y tangencial.

Atenuación ultrasónica; Es la pérdida de energía que experimenta un haz de ultrasonidos al atravesar un medio como lo es la madera como consecuencia de su absorción, reflexión, refracción y/o difusión. La atenuación guarda directa relación con la profundidad y con la frecuencia. corresponde a las propiedades físicas, como la estructura de las fibras y la microfisuración de forma.

Birrefringencia; o doble refracción es una propiedad óptica de ciertos cuerpos, que consiste en desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular

entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos: la primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí. Este fenómeno solo puede ocurrir si la estructura del material es anisótropa.

Caracterización básica química de la madera; determinación del pH, de la holocelulosa, la lignina, los extraíbles y las sustancias inorgánicas presentes en la madera de recuperación y el efecto de estos elementos en sus propiedades físico-mecánicas, por medio de diferentes técnicas normadas. Los componentes principales de la madera son la celulosa, un polisacárido que constituye alrededor de la mitad del material total, la lignina (aproximadamente un 25 %), que es un polímero resultante de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos y que proporciona dureza y protección, y la hemicelulosa (alrededor de un 25 %) cuya función es actuar como unión de las fibras. Existen otros componentes minoritarios como resinas, ceras, grasas y otras sustancias.

Contenido de Humedad; representa la relación entre la masa de agua que contiene y la masa de madera sin agua. La madera es un material higroscópico, es decir, tiene gran capacidad para captar y ceder humedad del medio ambiente según las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire. El indicador usado para medir el estado higroscópico de la madera es el contenido de humedad (CH), que corresponde a la cantidad de agua incluida en la madera, expresada en porcentaje de su masa seca.

Edificios Históricos; Son aquellos bienes muebles e inmuebles como ruinas, construcciones y objetos -entre otros- de propiedad fiscal, municipal o particular, que por su valor histórico o artístico o por su antigüedad deben ser conservados para el conocimiento y disfrute de las generaciones presentes y futuras. Existe una Comisión de Patrimonio Histórico que atiende las solicitudes de declaratoria relacionadas con bienes estos bienes.

Elementos del Patrimonio Construido; Es el conjunto de bienes edificados en los que la sociedad reconoce un valor cultural, tales como zonas, espacios abiertos monumentales, plazas, conjuntos históricos y monumentos. son los productos materiales inamovibles de la cultura, que pueden ser conservados y restaurados por algún tipo de intervención.

Ensayos físico-mecánicos; permiten conocer algunas de las propiedades mecánicas, así como el estado microestructural de diferentes materiales metálicos sin tener que destruir las muestras, ni desmontarlas y enviarlas a un laboratorio. Los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de

las maderas se realizan con el objeto de proponer los usos probables y obtener datos necesarios para el cálculo de estructuras elaboradas con dicho material.

Evaluación Ultrasonica; es un tipo de prueba no destructiva comúnmente utilizada para encontrar defectos en los materiales que permite evaluar de forma cuantitativa los parámetros relevantes, directa o indirectamente con el fin de conocer la vida útil del mismo.

Madera estructural de reciente Corta; es el material con el cual se elaboraron las vigas que van a sustituir al material estructural retirado en el proceso de restauración que fueron cortadas y seleccionadas como madera de primera calidad libres de defectos y con un hilo alineado al corte, con un contenido de humedad en equilibrio (no es madera verde) .

Madera estructural recuperación; Es el material resultante de la sustitución de los elementos de madera como son las vigas extraídas durante los trabajos de restauración, las cuales presentaban prácticamente solo daño en las zonas de las cabezas, así como también presentaban un pandeo en su zona central y grietas derivadas del esfuerzo de carga.

Métodos no destructivos de ultrasonido; es el proceso de inspección, prueba o evaluación de materiales, componentes o ensamblajes para detectar discontinuidades o diferencias en las características sin destruir la capacidad de servicio de la pieza o sistema. se caracterizan por no causar ningún tipo de daño en la forma y la composición de la pieza inspeccionada.

Módulo de Corte; describe la respuesta de un material ante la aplicación de un esfuerzo cortante que lo deforma. Otras denominaciones de uso frecuente para el módulo de corte son módulo de cizalla, cizalladura, de elasticidad transversal o de elasticidad tangencial.

Módulo de Young; es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Es uno de los métodos más extendidos para conocer la elasticidad de un material. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tracciona una barra, aumenta de longitud. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales. El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede encontrarse empíricamente mediante ensayo de tracción del material. Además de este módulo de elasticidad longitudinal, puede definirse el módulo de elasticidad transversal de un material (Modulo de cizalla).

Ondas Ultrasonicas; son una propagación de vibraciones en un medio material que posee las adecuadas condiciones de elasticidad. El valor de la longitud de ondas de ultrasonido incide en

los diferentes fenómenos asociados a la propagación de estas en la estructura interna del material que permite su evaluación.

Ortotrópico; es un material que tiene dos o tres ejes ortogonales entre sí, de doble simetría rotacional, de forma que sus propiedades mecánicas son, en general, diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes. Los materiales ortótropos son entonces anisótropos, ya que sus propiedades dependen de la dirección en que son medidas. En cambio, un material isótropo tiene las mismas propiedades en todas las direcciones. Los materiales transversalmente isótropos son un subtipo de material ortótropo. Un material ortótropo (lineal y homogéneo) requiere en general especificar 9 (como la madera) constantes elásticas, mientras que un material transversalmente ortótropo sólo requiere 5.

Rehabilitación; o la revitalización de centros históricos es un instrumento global para la recuperación integral de ámbitos urbanos, centrales, afectados por problemas habitacionales, con el objetivo de mejorar las condiciones de alojamiento de la población y otros aspectos de carácter urbanístico, social y económico, mediante la integración, la coordinación y el fomento de las distintas actuaciones que los agentes públicos y privados puedan desarrollar en dichos ámbitos urbanos. Conjunto de técnicas y métodos que sirven para recuperar la función o actividad de un bien mueble o inmueble que ha disminuido o se ha perdido a causa de un accidente o de un deterioro de las condiciones útiles del mismo.

Reparación; Proceso que consiste en detener el deterioro de objetos de valor histórico o artístico y en restaurarlos para devolverles su estado original. Para ello se examina la obra con el fin de identificar los materiales que entran en su composición y poder El mantenimiento del Patrimonio Cultural necesita un tratamiento especial, ya que se debe respetar la autenticidad en el sentido material, así como intangible. Pero cuando se trata de obras expuestas al aire libre, es difícil implantar medidas preventivas para controlar las condiciones ambientales que influyen en los procesos de deterioro. Por eso, las actuaciones se basan en el control y en el mantenimiento estructural del patrimonio cultural.

Resistencia mecánica; la resistencia mecánica es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. La resistencia mecánica de un cuerpo depende de su material y de su geometría. El parámetro empleado habitualmente para valorar la resistencia mecánica de un cuerpo es el coeficiente de seguridad. La Resistencia de Materiales combina los datos de material, geometría y fuerzas aplicadas para generar modelos matemáticos que permiten analizar la resistencia mecánica de los cuerpos. El ensayo de tracción es el ensayo más típico para comprobar la resistencia mecánica de un material con una probeta de geometría normalizada.

Restauración; en la arquitectura se describe un proceso metodológico que consiste entre otras cosas en la renovación de cualquier elemento de una edificación. Esta fase engloba una amplia gama de actividades, desde la limpieza de la fachada exterior hasta la consolidación de los cimientos. Es el grupo de procedimientos técnicos que buscan restablecer la estructura o unidad formal del edificio cuando éste se encuentra ya dañado, respetando siempre su historia y estética original. Se suele llevar a cabo en los bienes culturales más deteriorados.

Velocidad de onda Longitudinal; Las ondas en las que la perturbación es paralela a la dirección de propagación se denominan longitudinales. Un ejemplo muy importante lo constituyen las ondas sonoras propagándose en cualquier medio material, son ondas en el que el movimiento del material en la onda es de ida y vuelta en la misma dirección que la onda se mueve. La longitud de onda λ es la distancia entre picos o entre valles de una onda. La velocidad a la cual una onda viaja se llama velocidad de la onda.

Velocidad de onda Transversal; es una función de la posición y el tiempo (diferentes lugares de la onda se mueven hacia arriba o hacia abajo a velocidades diferentes en diferentes instantes de tiempo). Para ondas transversales, la amplitud de la onda es perpendicular al movimiento de esa onda, presenta una magnitud vectorial con oscilaciones en dirección perpendicular respecto a la dirección de propagación. Esta característica permite diferenciarlas de las ondas longitudinales, que oscilan en la misma dirección que el desplazamiento de la onda.

Velocidad ultrasónica; las ondas producen pequeñas amplitudes de vibraciones mecánicas y, dependiendo del modo utilizado, pueden ser inducidos esfuerzos longitudinales o de corte en un medio sólido La información de las propiedades estructurales en un medio puede ser determinada por medio de la medición de la velocidad y atenuación ultras

Correlación de la Atenuación (sentido LL, TT y RR)																			
	V LL	Is LL	V 2s LL	V 3s LL	V LL 1d	V LL 2d	V LL 3d	TT 1s	TT 2s	TT 3s	TT 1d	TT 2d	TT 3d	RR 1s	RR 2s	RR 3s	V 1d RR	V 2d RR	V 3d RR
V 1s LL		0.765	0.411	-0.73	1.142	1.596	0.637	-0.43	1.444	-0.96	0.972	0.342	-0.59	-2.75	-5.61	-6.68	-5.03	-7.62	
V 2s LL	-0.76		0.377	-0.35	0.377	0.831	-0.12	-1.2	0.679	-1.72	0.208	-0.42	-1.35	-3.51	-6.37	-7.44	-5.79	-8.38	
V 3s LL	-0.41	-0.35		-1.14	0.731	1.185	0.227	-0.84	1.033	-1.37	0.562	-0.06	-1.0	-3.16	-6.02	-7.09	-5.44	-8.03	
V 1d LL	0.732	1.497	1.142		1.874	2.328	1.369	0.295	2.176	-0.22	1.704	1.073	0.137	-2.02	-4.87	-5.95	-4.29	-6.89	
V 2d LL	-1.14	-0.37	-0.73	-1.87		0.454	-0.55	-1.57	0.302	-2.10	-0.17	-0.80	-1.73	-3.89	-6.72	-7.82	-6.17	-8.76	
V 3d LL	-1.59	-0.83	-0.83	-2.32	-0.45		-0.95	-2.03	-0.15	-2.55	-0.62	-1.25	-2.19	-4.35	-7.20	-8.27	-6.62	-9.21	
V 1s TT	-0.63	0.127	-0.22	-1.36	0.505	0.959		-1.07	0.807	-1.59	0.335	-0.29	-1.23	-3.39	-6.24	-7.32	-5.66	-8.26	
V 2s TT	0.437	1.202	0.847	-0.29	1.579	2.033	1.074		1.881	-0.52	1.409	0.778	-0.15	-2.31	-5.17	-6.24	-4.59	-7.18	
V 3s TT	-1.44	-0.67	-1.03	-2.17	-0.3	0.152	-0.80	-1.88		0.472	-2.40	-0.47	-1.10	-2.03	-4.19	-7.05	-8.12	-6.47	-9.06
V 1d TT	0.960	1.725	1.371	0.229	2.102	2.556	1.598	0.523	2.404		1.933	1.302	0.366	-1.79	-4.64	-5.72	-4.07	-6.66	
V 2d TT	-0.97	-0.20	-0.56	-1.70	0.170	0.624	-0.33	-1.40	0.472	-1.93		-0.63	-1.56	-3.72	-6.58	-7.65	-6.0	-8.59	
V 3d TT	-0.34	0.423	0.069	-1.07	0.800	1.254	0.296	-0.77	1.102	-1.30	0.631		-0.93	-3.09	-5.95	-7.02	-5.37	-7.96	
V 1s RR	0.594	1.359	1.005	-0.13	1.736	2.190	1.232	0.157	2.038	-0.36	1.567	0.936		-2.15	-5.01	-6.08	-4.43	-7.02	
V 2s RR	2.754	3.518	3.164	2.022	3.896	4.350	2.317	2.317	4.198	1.793	3.726	3.095	2.159		-2.85	-3.92	-2.27	-4.86	
V 3s RR	5.610	6.374	6.020	4.878	6.752	7.206	5.173	5.173	7.054	4.649	6.582	5.951	5.015	2.856		-1.07	0.579	-2.0	
V 1d RR	6.682	7.447	7.093	5.951	7.824	8.278	6.245	6.245	8.126	5.722	7.655	7.024	6.088	3.929	1.073		1.651	-0.94	
V 2d RR	5.031	5.796	5.441	4.299	6.173	6.627	4.594	4.594	6.475	4.071	6.003	5.372	4.437	2.277	-0.57	-1.65		-2.59	
V 3d RR	7.623	8.388	8.034	6.891	8.765	9.219	7.186	7.186	9.067	6.663	8.595	7.965	7.029	4.869	2.014	0.941	2.592		
					Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias												
					34.56	0.00	2.47												

Anexo 3 Análisis de Varianza y Correlación de la Velocidad Transversal, el Módulo de Corte y la Atenuación para las muestras de los dos grupos de madera Sana y Deteriorada en los sentidos de medición LT, LR, TL, TR, RL y RT.

Anexo 3. 4. Análisis de varianza para los sentidos LT, LR, TL, TR, RL y RT, de medición y el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA																			
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F													
Entre grupos	2159054020	35	61687257.71	175.3	0.00	1.44													
Dentro de los grupos	240657435.2	684	351838.3555																
Total	2399711455	719																	
					Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias												
					175.33	0.00	664.50												

Anexo 5 Atenuación Ultrasonica para los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición.

Anexo 5. 6. Análisis de varianza para los sentidos L_T , L_R , T_L , T_R , R_L y R_T , de medición y el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2867.16619	35	81.919034	22.84	0.00	1.44
Dentro de los grupos	2453.780072	684	3.587397766			
Total	5320.946262	719				

Comparación de Mediciones (L _T , L _R , T _L , T _R , R _L , R _T)						
Medición	V1	V2	V3	V4	V5	V6
V1L _T	0.37	0.20	0.51	-1.02	-2.04	-0.80
V1L _R	0.57	0.58	0.94	-1.66	-0.42	-1.19
V1T _L	-0.20	0.58	-0.71	-1.22	-2.24	-1.00
V1T _R	0.51	0.15	0.71	-0.51	-1.55	-0.20
V1R _L	1.02	0.64	1.22	0.51	-1.02	0.22
V1R _T	0.24	1.66	1.53	1.02	1.24	0.47
V2L _T	0.80	0.42	1.00	0.29	-0.22	-1.24
V2L _R	1.57	1.10	1.77	1.06	0.55	-0.47
V2T _L	0.83	0.46	1.04	0.35	-0.19	-1.21
V2T _R	0.45	0.05	0.68	-0.08	-0.59	-1.61
V2R _L	3.57	3.00	3.58	2.67	1.33	2.57
V2R _T	3.87	3.40	4.07	3.35	2.85	1.83
V3L _T	0.25	0.13	0.45	-0.25	-0.77	-1.19
V3L _R	0.59	0.22	0.79	0.08	-0.45	-0.98
V3T _L	-0.04	0.42	0.16	-0.35	-1.06	-2.08
V3T _R	-0.58	-0.85	-0.37	-1.08	-1.60	-2.62
V3R _L	4.40	4.00	4.68	3.97	3.46	2.44
V3R _T	4.72	4.35	4.95	4.27	3.70	2.68
V4L _T	-2.33	-2.71	-2.15	-2.94	-3.35	-4.37
V4L _R	-2.10	-2.47	-1.89	-3.12	-4.14	-2.90
V4T _L	1.91	1.54	2.12	1.44	0.89	-0.15
V4T _R	2.67	2.30	2.87	2.16	1.65	0.69
V4R _L	3.61	3.32	3.81	3.10	2.59	1.57
V4R _T	3.61	3.32	3.81	3.10	2.59	1.57
V5L _T	-0.80	-1.17	-0.60	-1.31	-1.82	-2.84
V5L _R	-0.55	-0.85	-0.35	-1.06	-1.57	-2.59
V5T _L	2.58	2.21	2.79	2.08	1.56	0.54
V5T _R	1.12	0.74	1.32	0.61	0.10	-0.92
V6L _T	4.65	4.47	5.05	4.34	3.85	2.81
V6L _R	5.86	5.48	6.06	5.35	4.84	3.82
V6T _L	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V6T _R	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V7L _T	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V7L _R	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V7T _L	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V7T _R	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V8L _T	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V8L _R	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V8T _L	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68
V8T _R	4.72	4.35	4.93	4.22	3.70	2.68

Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias
22.84	0.00	2.12

Anexo 6 Resultados y análisis para las mediciones del contenido de sustancias inorgánicas (porcentaje de cenizas) para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 6.7. Análisis de varianza para el contenido de ceniza en albura y duramen sano y deteriorado, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA																
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados		Grados de libertad		Promedio de los cuadrados		F	Probabilidad	Valor crítico para F							
Entre grupos	13.60547516		15		0.907031677		73.08	0.00	1.74							
Dentro de los grupos	1.7871485		144		0.012410753											
Total	15.39262366		159													
As, Ad, Ds y Dd % Ceniza																
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd
V2 S As		-0.07	-0.01	-0.05	-0.03	-0.07	-0.44	-0.68	-0.09	-0.24	-0.28	0.20	-0.95	-0.10	0.16	-0.38
V1 As	0.07		0.06	0.02	0.04	0.00	-0.36	-0.60	-0.02	-0.17	-0.20	0.27	-0.88	-0.03	0.24	-0.31
V2 As	0.01	0.06		-0.04	-0.03	-0.06	-0.43	-0.67	-0.08	-0.23	-0.27	0.21	-0.94	-0.09	0.17	-0.38
V4 As	0.05	-0.02	0.04		0.02	-0.02	-0.39	-0.62	-0.04	-0.19	-0.23	0.25	-0.90	-0.05	0.22	-0.33
V1 Ad	0.03	-0.04	0.03	-0.02		-0.04	-0.40	-0.64	-0.06	-0.21	-0.24	0.23	-0.92	-0.07	0.20	-0.35
V2Ad	0.07	0.00	0.00	0.02	0.04		-0.37	-0.60	-0.02	-0.17	-0.21	0.27	-0.88	-0.03	0.24	-0.31
V4 Ad	0.44	0.36	0.43	0.39	0.40	0.37		-0.24	0.35	0.19	0.16	0.64	-0.51	0.33	0.60	0.05
V2 S Ds	0.68	0.60	0.67	0.62	0.64	0.60	0.24		0.59	0.43	0.40	0.88	-0.28	0.57	0.84	0.29
V1 Ds	0.09	0.02	0.08	0.04	0.06	0.02	-0.35	-0.59		-0.15	-0.19	0.29	-0.86	-0.01	0.25	-0.29
V2 Ds	0.24	0.17	0.23	0.19	0.21	0.17	-0.19	-0.43	0.15		-0.04	0.44	-0.71	0.14	0.41	-0.14
V4 Ds	0.28	0.20	0.27	0.23	0.24	0.21	-0.16	-0.40	0.19	0.04		0.48	-0.67	0.17	0.44	-0.11
V5 Ds	-0.20	-0.27	-0.21	-0.25	-0.23	-0.27	-0.64	-0.88	-0.29	-0.44	-0.48		-1.15	-0.30	-0.04	-0.58
V1 Dd	0.95	0.88	0.94	0.90	0.92	0.88	0.51	0.28	0.86	0.71	0.67	1.15		0.85	1.12	0.57
V2 Dd	0.10	0.03	0.09	0.05	0.07	0.03	-0.57	-0.57	0.01	-0.14	-0.17	0.30	-0.85		0.27	-0.28
V4 Dd	-0.16	-0.24	-0.17	-0.22	-0.20	-0.24	-0.84	-0.84	-0.25	-0.41	-0.44	0.04	-1.12	-0.27		-0.55
V5 Dd	0.38	0.31	0.38	0.33	0.35	0.31	-0.05	-0.29	0.29	0.14	0.11	0.58	-0.57	0.28	0.55	
			Valor de F				Valor de p				Diferencia de Medias					
			73.06				0.00				0.17					

Anexo 7 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de pH para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 7.8. Análisis de varianza para el pH en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	15.79889297	15	1.053259531	130.51	0.00	1.74
Dentro de los grupos	1.162115372	144	0.008070246			
Total	16.96100834	159				

As, Ad, Ds y Dd % Ph																
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd
V2 S As		-0.99	-0.05	-0.35	-0.25	-0.04	-0.37	0.21	-0.60	-0.51	-0.21	-0.26	-0.45	0.33	-0.08	0.02
V1 As	0.99		0.94	0.64	0.74	0.95	0.62	1.20	0.39	0.48	0.78	0.73	0.54	1.32	0.91	1.01
V2 As	0.05	0.94		-0.29	-0.20	0.01	-0.31	0.26	-0.55	-0.46	-0.16	-0.21	-0.39	0.38	-0.03	0.07
V4 As	0.35	-0.64	0.29		0.10	0.30	-0.02	0.55	-0.25	-0.16	0.13	0.09	-0.10	0.68	0.27	0.37
V1 Ad	0.25	-0.74	0.20	-0.10		0.21	-0.12	0.46	-0.35	-0.26	0.04	-0.01	-0.20	0.58	0.17	0.27
V2Ad	0.04	-0.95	-0.95	-0.30	-0.21		-0.32	0.25	-0.56	-0.47	-0.17	-0.22	-0.40	0.37	-0.04	0.06
V4 Ad	0.37	-0.62	0.31	0.02	0.12	0.32		0.57	-0.23	-0.14	0.15	0.11	-0.08	0.70	0.29	0.39
V2 S Ds	-0.21	-1.20	-0.26	-0.55	-0.46	-0.25	-0.57		-0.81	-0.72	-0.42	-0.47	-0.65	0.12	-0.29	-0.19
V1 Ds	0.60	-0.39	0.55	0.25	0.35	0.56	0.23	0.81		0.09	0.39	0.34	0.15	0.93	0.52	0.62
V2 Ds	0.51	-0.48	0.46	0.16	0.26	0.47	0.14	0.72	-0.09		0.30	0.25	0.06	0.84	0.43	0.53
V4 Ds	0.21	-0.78	0.16	-0.13	-0.04	0.17	-0.15	0.42	-0.39	-0.30		-0.05	-0.23	0.54	0.13	0.23
V5 Ds	0.26	-0.73	0.21	-0.09	0.01	0.22	-0.11	0.47	-0.34	-0.25	0.05		-0.19	0.59	0.18	0.28
V1 Dd	0.45	-0.54	0.39	0.10	0.20	0.40	0.08	0.65	-0.15	-0.06	0.23	0.19		0.78	0.37	0.47
V2 Dd	-0.33	-1.32	-0.38	-0.68	-0.58	-0.37	-0.12	-0.12	-0.93	-0.84	-0.54	-0.59	-0.78		-0.41	-0.31
V4 Dd	0.08	-0.91	0.03	-0.27	-0.17	0.04	0.29	0.29	-0.52	-0.43	-0.13	-0.18	-0.37	0.41		0.10
V5 Dd	-0.02	-1.01	-0.07	-0.37	-0.27	-0.06	-0.39	0.19	-0.62	-0.53	-0.23	-0.28	-0.47	0.31	-0.10	
	Valor de F			Valor de ρ			Diferencia de Medias									
	130.51			0.00			0.14									

Anexo 8 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Solubilidad a la sosa (extraíbles solubles en sosa) para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 8.9. Análisis de varianza para material soluble en sosa caustica en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA																
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F										
Entre grupos	4434.2876	15	295.6191734	1192.22	0.00	1.74										
Dentro de los grupos	35.70584302	144	0.247957243													
Total	4469.993443	159														
As, Ad, Ds y Dd % Materia soluble en sosa cáustica																
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd
V2 S As		4.71	-3.53	-2.45	-6.95	-7.90	2.12	-8.99	-2.34	-10.1	-2.96	-11.6	-12.8	-12.7	-0.98	-0.79
V1 As	-4.71		-8.24	-7.16	-11.6	-12.6	-2.59	-13.71	-7.05	-14.8	-7.67	-16.3	-17.6	-17.4	-5.69	-5.51
V2 As	3.53	-8.24		1.09	-3.42	-4.37	5.65	-5.46	1.20	-6.62	0.58	-8.07	-9.36	-9.18	2.55	2.74
V4 As	2.45	7.16	-1.09		-4.50	-5.45	4.57	-6.55	0.11	-7.70	-0.51	-9.15	-10.4	-10.2	1.47	1.65
V1 Ad	6.95	11.66	3.42	4.50		-0.95	9.07	-2.04	4.62	-3.20	4.00	-4.65	-5.94	-5.76	5.97	6.16
V2Ad	7.90	12.61	12.61	5.45	0.95		10.02	-1.09	5.57	-2.25	4.95	-3.70	-4.99	-4.81	6.92	7.11
V4 Ad	-2.12	2.59	-5.65	-4.57	-9.07	-10.0		-11.12	-4.46	-12.2	-5.08	-13.7	-15.0	-14.8	-3.10	-2.92
V2 S Ds	8.99	13.71	5.46	6.55	2.04	1.09	11.12		6.66	-1.16	6.04	-2.60	-3.90	-3.72	8.02	8.20
V1 Ds	2.34	7.05	-1.20	-0.11	-4.62	-5.57	4.46	-6.66		-7.82	-0.62	-9.26	-10.5	-10.3	1.36	1.54
V2 Ds	10.15	14.86	6.62	7.70	3.20	2.25	12.27	1.16	7.82		7.19	-1.45	-2.74	-2.56	9.17	9.36
V4 Ds	2.96	7.67	-0.58	0.51	-4.00	-4.95	5.08	-6.04	0.62	-7.19		-8.64	-9.94	-9.76	1.98	2.16
V5 Ds	11.60	16.31	8.07	9.15	4.65	3.70	13.72	2.60	9.26	1.45	8.64		-1.29	-1.11	10.62	10.80
V1 Dd	12.89	17.60	9.36	10.44	5.94	4.99	15.01	3.90	10.56	2.74	9.94	1.29		0.18	11.91	12.10
V2 Dd	12.71	17.42	9.18	10.27	5.76	4.81	3.72	3.72	10.38	2.56	9.76	1.11	-0.18		11.73	11.92
V4 Dd	0.98	5.69	-2.55	-1.47	-5.97	-6.92	-8.02	-8.02	-1.36	-9.17	-1.98	-10.6	-11.9	-11.7		0.18
V5 Dd	0.79	5.51	-2.74	-1.65	-6.16	-7.11	-8.20	-8.20	-1.54	-9.36	-2.16	-10.8	-12.1	-11.9	-0.18	
	Valor de F			Valor de ρ			Diferencia de Medias									
	1192.22			0.00			0.76									

Anexo 9. Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Ciclohexano para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 9.10. Análisis de varianza para ciclohexano en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	295.4392136	15	19.69594757	9698.10	0.00	1.74
Dentro de los grupos	0.292450838	144	0.002030909			
Total	295.7316644	159				

As, Ad, Ds y Dd % Ciclohexano																	
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd	
V2 S As		0.72	0.30	0.23	0.50	0.36	0.28	-5.02	-0.29	-0.96	0.16	-1.92	0.35	-0.87	-0.06	-0.90	
V1 As	-0.72		-0.42	-0.49	-0.22	-0.36	-0.44	-5.74	-1.01	-1.68	-0.56	-2.64	-0.37	-1.59	-0.78	-1.62	
V2 As	-0.30	-0.42		-0.07	0.20	0.06	-0.01	-5.31	-0.58	-1.26	-0.13	-2.22	0.05	-1.17	-0.35	-1.20	
V4 As	-0.23	0.49	0.07		0.27	0.13	0.06	-5.24	-0.51	-1.19	-0.06	-2.15	0.12	-1.10	-0.28	-1.13	
V1 Ad	-0.50	0.22	-0.20	-0.27		-0.14	-0.22	-5.52	-0.79	-1.47	-0.34	-2.42	-0.15	-1.37	-0.56	-1.40	
V2 Ad	-0.36	0.36	0.36	-0.13	0.14		-0.07	-5.37	-0.64	-1.32	-0.19	-2.28	-0.01	-1.23	-0.41	-1.26	
V4 Ad	-0.28	0.44	0.01	-0.06	0.22	0.07		-5.30	-0.57	-1.25	-0.12	-2.21	0.06	-1.16	-0.34	-1.18	
V2 S Ds	5.02	5.74	5.31	5.24	5.52	5.37	5.30		4.73	4.05	5.18	3.10	5.36	4.14	4.96	4.12	
V1 Ds	0.29	1.01	0.58	0.51	0.79	0.64	0.57	-4.73		-0.68	0.45	-1.64	0.63	-0.59	0.23	-0.61	
V2 Ds	0.96	1.68	1.26	1.19	1.47	1.32	1.25	-4.05	0.68		1.13	-0.96	1.31	0.09	0.91	0.06	
V4 Ds	-0.16	0.56	0.13	0.06	0.34	0.19	0.12	-5.18	-0.45	-1.13		-2.08	0.18	-1.04	-0.22	-1.06	
V5 Ds	1.92	2.64	2.22	2.15	2.42	2.28	2.21	-3.10	1.64	0.96	2.08		2.27	1.05	1.86	1.02	
V1 Dd	-0.35	0.37	-0.05	-0.12	0.15	0.01	-0.06	-5.36	-0.63	-1.31	-0.18	-2.27		-1.22	-0.40	-1.25	
V2 Dd	0.87	1.59	1.17	1.10	1.37	1.23	-4.14	-4.14	0.59	-0.09	1.04	-1.05	1.22		0.82	-0.03	
V4 Dd	0.06	0.78	0.35	0.28	0.56	0.41	-4.96	-4.96	-0.23	-0.91	0.22	-1.86	0.40	-0.82		-0.84	
V5 Dd	0.90	1.62	1.20	1.13	1.40	1.26	1.18	-4.12	0.61	-0.06	1.06	-1.02	1.25	0.03	0.84		
	Valor de F					Valor de ρ					Diferencia de Medias						
	9698.10					0.00					0.07						

Anexo 10 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Acetona para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 10.11. Análisis de varianza para acetona en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1101.485452	15	73.4323635	1750.61	0.00	1.74
Dentro de los grupos	6.04032897	144	0.041946729			
Total	1107.525781	159				

As, Ad, Ds y Dd % Acetona																	
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd	
V2 S As		1.56	1.28	0.96	0.70	0.83	0.41	-7.69	1.03	-3.45	1.00	-4.47	-0.53	-2.48	1.05	-3.85	
V1 As	-1.56		-0.28	-0.60	-0.87	-0.73	-1.16	-9.25	-0.53	-5.02	-0.57	-6.04	-2.09	-4.05	-0.52	-5.41	
V2 As	-1.28	-0.28		-0.32	-0.59	-0.45	-0.88	-8.97	-0.25	-4.74	-0.29	-5.76	-1.81	-3.77	-0.24	-5.13	
V4 As	-0.96	0.60	0.32		-0.27	-0.13	-0.56	-8.65	0.07	-4.41	0.03	-5.43	-1.49	-3.44	0.08	-4.81	
V1 Ad	-0.70	0.87	0.59	0.27		0.14	-0.29	-8.38	0.33	-4.15	0.30	-5.17	-1.22	-3.18	0.35	-4.55	
V2 Ad	-0.83	0.73	0.73	0.13	-0.14		-0.43	-8.52	0.20	-4.29	0.16	-5.31	-1.36	-3.32	0.21	-4.68	
V4 Ad	-0.41	1.16	0.88	0.56	0.29	0.43		-8.10	0.62	-3.86	0.59	-4.88	-0.94	-2.89	0.64	-4.26	
V2 S Ds	7.69	9.25	8.97	8.65	8.38	8.52	8.10		8.72	4.24	8.68	3.22	7.16	5.21	8.73	3.84	
V1 Ds	-1.03	0.53	0.25	-0.07	-0.33	-0.20	-0.62	-8.72		-4.48	-0.04	-5.50	-1.56	-3.51	0.02	-4.88	
V2 Ds	3.45	5.02	4.74	4.41	4.15	4.29	3.86	-4.24	4.48		4.45	-1.02	2.92	0.97	4.50	-0.40	
V4 Ds	-1.00	0.57	0.29	-0.03	-0.30	-0.16	-0.59	-8.68	0.04	-4.45		-5.47	-1.52	-3.48	0.05	-4.84	
V5 Ds	4.47	6.04	5.76	5.43	5.17	5.31	4.88	-3.22	5.50	1.02	5.47		3.94	1.99	5.52	0.62	
V1 Dd	0.53	2.09	1.81	1.49	1.22	1.36	0.94	-7.16	1.56	-2.92	1.52	-3.94		-1.95	1.57	-3.32	
V2 Dd	2.48	4.05	3.77	3.44	3.18	3.32	-5.21	-5.21	3.51	-0.97	3.48	-1.99	1.95		3.53	-1.37	
V4 Dd	-1.05	0.52	0.24	-0.08	-0.35	-0.21	-8.73	-8.73	-0.02	-4.50	-0.05	-5.52	-1.57	-3.53		-4.90	
V5 Dd	3.85	5.41	5.13	4.81	4.55	4.68	4.26	-3.84	4.88	0.40	4.84	-0.62	3.32	1.37	4.90		
	Valor de F					Valor de r					Diferencia de Medias						
	1750.61					0.00					0.31						

Anexo 11 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Metanol para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 11.12. Análisis de varianza para metanol en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	165.4550488	15	11.03033659	161.95	0.00	1.74
Dentro de los grupos	9.807511081	144	0.068107716			
Total	175.2625599	159				

As, Ad, Ds y Dd % Metanol																	
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd	
V2 S As		-0.29	0.04	1.36	-0.58	-0.86	0.27	-1.07	-0.99	-2.16	0.19	-1.59	-0.76	-2.83	0.02	-1.74	
V1 As	0.29		0.34	1.65	-0.28	-0.57	0.57	-0.78	-0.70	-1.87	0.49	-1.30	-0.46	-2.54	0.31	-1.45	
V2 As	-0.04	0.34		1.31	-0.62	-0.91	0.23	-1.11	-1.04	-2.21	0.15	-1.64	-0.80	-2.88	-0.03	-1.78	
V4 As	-1.36	-1.65	-1.31		-1.93	-2.22	-1.08	-2.43	-2.35	-3.52	-1.16	-2.95	-2.11	-4.19	-1.34	-3.10	
V1 Ad	0.58	0.28	0.62	1.93		-0.29	0.85	-0.49	-0.42	-1.59	0.77	-1.02	-0.18	-2.26	0.59	-1.16	
V2Ad	0.86	0.57	0.57	2.22	0.29		1.14	-0.21	-0.13	-1.30	1.06	-0.73	0.11	-1.97	0.88	-0.88	
V4 Ad	-0.27	-0.57	-0.23	1.08	-0.85	-1.14		-1.34	-1.26	-2.44	-0.08	-1.87	-1.03	-3.11	-0.25	-2.01	
V2 S Ds	1.07	0.78	1.11	2.43	0.49	0.21	1.34		0.08	-1.09	1.26	-0.52	0.31	-1.76	1.09	-0.67	
V1 Ds	0.99	0.70	1.04	2.35	0.42	0.13	1.26	-0.08		-1.17	1.19	-0.60	0.24	-1.84	1.01	-0.75	
V2 Ds	2.16	1.87	2.21	3.52	1.59	1.30	2.44	1.09	1.17		2.36	0.57	1.41	-0.67	2.18	0.42	
V4 Ds	-0.19	-0.49	-0.15	1.16	-0.77	-1.06	0.08	-1.26	-1.19	-2.36		-1.79	-0.95	-3.03	-0.18	-1.93	
V5 Ds	1.59	1.30	1.64	2.95	1.02	0.73	1.87	0.52	0.60	-0.57	1.79		0.84	-1.24	1.61	-0.15	
V1 Dd	0.76	0.46	0.80	2.11	0.18	-0.11	1.03	-0.31	-0.24	-1.41	0.95	-0.84		-2.08	0.77	-0.98	
V2 Dd	2.83	2.54	2.88	4.19	2.26	1.97	1.76	1.76	1.84	0.67	3.03	1.24	2.08		2.85	1.09	
V4 Dd	-0.02	-0.31	0.03	1.34	-0.59	-0.88	-1.09	-1.09	-1.01	-2.18	0.18	-1.61	-0.77	-2.85		-1.76	
V5 Dd	1.74	1.45	1.78	3.10	1.16	0.88	2.01	0.67	0.75	-0.42	1.93	0.15	0.98	-1.09	1.76		
	Valor de F				Valor de p				Diferencia de Medias								
	161.95				0.00				0.40								

Anexo 12 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de extraíbles solubles en Agua caliente para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 12.13. Análisis de varianza para agua caliente en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	738.311545	15	49.2207696	795.55	0.00	1.74
Dentro de los grupos	8.90933445	144	0.061870378			
Total	747.220879	159				

As, Ad, Ds y Dd % Agua																	
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2 Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd	
V2 S As		-3.59	2.30	-0.78	-4.94	-2.49	-1.59	-1.94	-2.88	1.89	-4.71	-1.59	-4.44	-3.55	-3.37	-4.38	
V1 As	3.59		5.89	2.80	-1.35	1.10	2.00	1.65	0.71	5.48	-1.12	2.00	-0.86	0.04	0.22	-0.80	
V2 As	-2.30	5.89		-3.09	-7.24	-4.79	-3.89	-4.24	-5.18	-0.41	-7.01	-3.89	-6.75	-5.85	-5.67	-6.69	
V4 As	0.78	-2.80	3.09		-4.16	-1.70	-0.80	-1.16	-2.09	2.67	-3.92	-0.81	-3.66	-2.76	-2.58	-3.60	
V1 Ad	4.94	1.35	7.24	4.16		2.45	3.35	3.00	2.06	6.83	0.23	3.35	0.50	1.39	1.57	0.55	
V2Ad	2.49	-1.10	-1.10	1.70	-2.45		0.90	0.54	-0.39	4.37	-2.22	0.90	-1.96	-1.06	-0.88	-1.90	
V4 Ad	1.59	-2.00	3.89	0.80	-3.35	-0.90		-0.35	-1.29	3.48	-3.12	0.00	-2.86	-1.96	-1.78	-2.80	
V2 S Ds	1.94	-1.65	4.24	1.16	-3.00	-0.54	0.35		-0.93	3.83	-2.76	0.35	-2.50	-1.61	-1.42	-2.44	
V1 Ds	2.88	-0.71	5.18	2.09	-2.06	0.39	1.29	0.93		4.77	-1.83	1.29	-1.57	-0.67	-0.49	-1.51	
V2 Ds	-1.89	-5.48	0.41	-2.67	-6.83	-4.37	-3.48	-3.83	-4.77		-6.60	-3.48	-6.33	-5.44	-5.26	-6.27	
V4 Ds	4.71	1.12	7.01	3.92	-0.23	2.22	3.12	2.76	1.83	6.60		3.12	0.26	1.16	1.34	0.32	
V5 Ds	1.59	-2.00	3.89	0.81	-3.35	-0.90	0.00	-0.35	-1.29	3.48	-3.12		-2.85	-1.96	-1.78	-2.79	
V1 Dd	4.44	0.86	6.75	3.66	-0.50	1.96	2.86	2.50	1.57	6.33	-0.26	2.85		0.90	1.08	0.06	
V2 Dd	3.55	-0.04	5.85	2.76	-1.39	1.06	1.61	1.61	0.67	5.44	-1.16	1.96	-0.90		0.18	-0.84	
V4 Dd	3.37	-0.22	5.67	2.58	-1.57	0.88	1.42	1.42	0.49	5.26	-1.34	1.78	-1.08	-0.18		-1.02	
V5 Dd	4.38	0.80	6.69	3.60	-0.55	1.90	2.80	2.44	1.51	6.27	-0.32	2.79	-0.06	0.84	1.02		
	Valor de F				Valor de p				Diferencia de Medias								
	795.55				0.00				0.38								

Anexo 13 Holecelulosa.

Anexo 13.14. Análisis de varianza para holecelulosa en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4531.723474	15	302.1148983	3201.94	0.00	1.74
Dentro de los grupos	13.58693398	144	0.094353708			
Total	4545.310408	159				

As, Ad, Ds y Dd % Holecelulosa																	
	V2 S As	V1 As	V2 As	V4 As	V1 Ad	V2Ad	V4 Ad	V2 S Ds	V1 Ds	V2 Ds	V4 Ds	V5 Ds	V1 Dd	V2 Dd	V4 Dd	V5 Dd	
V2 S As		-3.59	-0.85	-5.63	2.46	3.33	-0.10	2.72	7.06	9.46	-4.49	3.28	8.69	10.34	-2.25	11.68	
V1 As	3.59		2.74	-2.04	6.04	6.92	3.48	6.31	10.6	13.0	-0.90	6.87	12.2	13.93	1.33	15.26	
V2 As	0.85	2.74		-4.77	3.31	4.18	0.75	3.57	7.91	10.3	-3.64	4.13	9.55	11.1	-1.40	12.5	
V4 As	5.63	2.04	4.77		8.08	8.96	5.52	8.34	12.6	15.0	1.14	8.91	14.3	15.9	3.37	17.3	
V1 Ad	-2.46	-6.04	-3.31	-8.08		0.88	-2.56	0.26	4.60	7.01	-6.95	0.83	6.24	7.88	-4.71	9.22	
V2Ad	-3.33	-6.92	-6.92	-8.96	-0.88		-3.44	-0.62	3.72	6.13	-7.82	-0.05	5.36	7.01	-5.59	8.34	
V4 Ad	0.10	-3.48	-0.75	-5.52	2.56	3.44		2.82	7.16	9.57	-4.38	3.39	8.80	10.4	-2.15	11.7	
V2 S Ds	-2.72	-6.31	-3.57	-8.34	-0.26	0.62	-2.82		4.34	6.75	-7.21	0.57	5.98	7.62	-4.97	8.96	
V1 Ds	-7.06	-10.6	-7.91	-12.6	-4.60	-3.7	-7.16	-4.34		2.41	-11.5	-3.77	1.64	3.29	-9.31	4.62	
V2 Ds	-9.46	-13.0	-10.3	-15.0	-7.01	-6.1	-9.57	-6.75	-2.41		-13.9	-6.18	-0.77	0.88	-11.7	2.21	
V4 Ds	4.49	0.90	3.64	-1.14	6.95	7.82	4.38	7.21	11.5	13.9		7.77	13.1	14.8	2.24	16.1	
V5 Ds	-3.28	-6.87	-4.13	-8.91	-0.83	0.05	-3.39	-0.57	3.77	6.18	-7.77		5.41	7.06	-5.54	8.39	
V1 Dd	-8.69	-12.2	-9.55	-14.3	-6.24	-5.3	-8.80	-5.98	-1.64	0.77	-13.1	-5.41		1.65	-10.9	2.98	
V2 Dd	-10.34	-13.9	-11.1	-15.9	-7.88	-7.0	-7.62	-7.62	-3.29	-0.88	-14.8	-7.06	-1.65		-12.5	1.34	
V4 Dd	2.25	-1.33	1.40	-3.37	4.71	5.59	4.97	4.97	9.31	11.7	-2.24	5.54	10.9	12.5		13.9	
V5 Dd	-11.68	-15.2	-12.5	-17.3	-9.22	-8.3	-8.96	-8.96	-4.62	-2.21	-16.1	-8.39	-2.98	-1.34	-13.9		
	Valor de F				Valor de r				Diferencia de Medias								
	3201.94				0.00				0.47								

Anexo 14 Sustancias extraíbles.

Anexo 14.15. Análisis de varianza para sustancias extraíbles en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	44.88357947	4	11.22089487	2.783038641	0.032584288	2.493696004
Dentro de los grupos	302.391459	75	4.03188612			
Total	347.2750384	79				
Extraíbles Totales						
	V2 S	V1	V2	V4	V5	
V2 S		0.12	0.23	0.74	-1.49	
V1	-0.12		0.11	0.62	-1.61	
V2	-0.23	0.11		0.51	-1.72	
V4	-0.74	-0.62	-0.51		-2.23	
V5	1.49	1.61	1.72	2.23		
	Valor de F		Valor de r		Diferencia de Medias	
	2.78		0.03		3.20	

Anexo 15 Resultados y análisis para las mediciones del porcentaje de Lignina Runkel para albura y duramen (sano y deteriorado).

Anexo 15.16. Análisis de varianza para lignina en albura y duramen, así como el resultado de la prueba de Tukey planteado por el diseño experimental (madera sana y deteriorada).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1469.016659	15	97.9344439	152.16	0.00	1.74
Dentro de los grupos	92.68139708	144	0.643620813			
Total	1561.698056	159				

As, Ad, Ds y Dd % Lignina																	
	V2 S	V1	V2	V4	V1	V2	V4	V2	S	V1	V2	V4	V5	V1	V2	V4	V5 Dd
	As	As	As	As	Ad	Ad	Ad	Ds	Ds	Ds	Ds	Ds	Ds	Dd	Dd	Dd	
V2 S As		-1.01	-0.58	-9.16	-5.80	-4.34	-2.07	-4.45	-4.47	-5.02	-5.77	-4.90	-8.41	-7.03	-6.98	-11.22	
V1 As	1.01		0.43	-8.15	-4.79	-3.33	-1.06	-3.44	-3.46	-4.01	-4.77	-3.89	-7.40	-6.02	-5.97	-10.21	
V2 As	0.58	0.43		-8.58	-5.22	-3.77	-1.49	-3.87	-3.89	-4.44	-5.20	-4.32	-7.83	-6.45	-6.40	-10.64	
V4 As	9.16	8.15	8.58		3.36	4.82	7.09	4.71	4.69	4.14	3.38	4.26	0.75	2.13	2.18	-2.06	
V1 Ad	5.80	4.79	5.22	-3.36		1.46	3.73	1.35	1.33	0.78	0.03	0.90	-2.61	-1.23	-1.18	-5.42	
V2Ad	4.34	3.33	3.33	-4.82	-1.46		2.27	-0.11	-0.12	-0.67	-1.43	-0.55	-4.06	-2.69	-2.63	-6.88	
V4 Ad	2.07	1.06	1.49	-7.09	-3.73	-2.27		-2.38	-2.40	-2.95	-3.71	-2.83	-6.34	-4.96	-4.91	-9.15	
V2 S Ds	4.45	3.44	3.87	-4.71	-1.35	0.11	2.38		-0.02	-0.57	-1.32	-0.45	-3.96	-2.58	-2.53	-6.77	
V1 Ds	4.47	3.46	3.89	-4.69	-1.33	0.12	2.40	0.02		-0.55	-1.31	-0.43	-3.94	-2.57	-2.51	-6.75	
V2 Ds	5.02	4.01	4.44	-4.14	-0.78	0.67	2.95	0.57	0.55		-0.76	0.12	-3.39	-2.02	-1.96	-6.21	
V4 Ds	5.77	4.77	5.20	-3.38	-0.03	1.43	3.71	1.32	1.31	0.76		0.88	-2.63	-1.26	-1.20	-5.45	
V5 Ds	4.90	3.89	4.32	-4.26	-0.90	0.55	2.83	0.45	0.43	-0.12	-0.88		-3.51	-2.14	-2.08	-6.33	
V1 Dd	8.41	7.40	7.83	-0.75	2.61	4.06	6.34	3.96	3.94	3.39	2.63	3.51		1.37	1.43	-2.82	
V2 Dd	7.03	6.02	6.45	-2.13	1.23	2.69	2.58	2.58	2.57	2.02	1.26	2.14	-1.37		0.06	-4.19	
V4 Dd	6.98	5.97	6.40	-2.18	1.18	2.63	2.53	2.53	2.51	1.96	1.20	2.08	-1.43	-0.06		-4.25	
V5 Dd	11.22	10.21	10.64	2.06	5.42	6.88	6.77	6.77	6.75	6.21	5.45	6.33	2.82	4.19	4.25		
			Valor de F			Valor de ρ			Diferencia de Medias								
			152.16			0.00			1.22								

Anexo 15.17. Análisis de varianza y Correlación de la velocidad de onda madera sana y deteriorada (sentido LL).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6763036160	31	218162456.8	1038.733254	3.2097E-276	1.491251393
Dentro de los grupos	60487894.55	288	210027.4116			
Total	6823524054	319				

Anexo 16.18. Análisis de varianza y Correlación de la velocidad de onda madera sana y deteriorada (sentido LL).

ANÁLISIS DE VARIANZA									
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F			
Entre grupos	6763036160	31	218162456.8	1038.733254	3.2097E-276	1.491251393			
Dentro de los grupos	60487894.55	288	210027.4116						
Total	6823524054	319							

Correlación de la velocidad de onda madera sana y deteriorada (sentido LL)									
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	r	Diferencia de Medias				
Entre grupos	6763036160	31	218162456.8	0.00	775.34				
Dentro de los grupos	60487894.55	288	210027.4116						
Total	6823524054	319							

Anexo 16.19. Análisis de varianza y la Correlación de la velocidad de onda madera sana y deteriorada (sentido TR).

ANÁLISIS DE VARIANZA									
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F			
Entre grupos	6409126.384	31	206746.0124	14.77425921	3.412E-43	1.491251393			
Dentro de los grupos	4030175.099	288	13993.66354						
Total	10439301.48	319							

Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias
14.77	0.00	200.13

Anexo 17 Resultados y análisis para las mediciones del Módulo de Young empleando ondas de esfuerzo en las vigas de material deteriorado.

Anexo 17. 20. Análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young para ondas de esfuerzo (LL y TT).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	12128377583	31	391237986.6	60.11820317	2.7164E-107	1.491251393
Dentro de los grupos	1874249964	288	6507812.375			
Total	14002627547	319				

Valor de F		Valor de r		Diferencia de Medias	
60.12		0.00		4,315.90	

Anexo 17.21. Análisis de varianza y Correlación del Módulo de Young para ondas de esfuerzo (T y R).

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	8985.572099	31	289.8571645	18.43449379	1.49593E-51	1.491251393
Dentro de los grupos	4528.405517	288	15.72363027			
Total	13513.97762	319				
Concentración de la Varianza de Esfuerzo (T y R)						
V10a	V10b	V10c	V10d	V10e	V10f	V10g
1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11
1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18
1.19	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25
1.26	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31	1.32
1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39
1.40	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46
1.47	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53
1.54	1.55	1.56	1.57	1.58	1.59	1.60
1.61	1.62	1.63	1.64	1.65	1.66	1.67
1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73	1.74
1.75	1.76	1.77	1.78	1.79	1.80	1.81
1.82	1.83	1.84	1.85	1.86	1.87	1.88
1.89	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95
1.96	1.97	1.98	1.99	2.00	2.01	2.02
2.03	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.09
2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16
2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.30
2.31	2.32	2.33	2.34	2.35	2.36	2.37
2.38	2.39	2.40	2.41	2.42	2.43	2.44
2.45	2.46	2.47	2.48	2.49	2.50	2.51
2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58
2.59	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.65
2.66	2.67	2.68	2.69	2.70	2.71	2.72
2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.78	2.79
2.80	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86
2.87	2.88	2.89	2.90	2.91	2.92	2.93
2.94	2.95	2.96	2.97	2.98	2.99	3.00
3.01	3.02	3.03	3.04	3.05	3.06	3.07
3.08	3.09	3.10	3.11	3.12	3.13	3.14
3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21
3.22	3.23	3.24	3.25	3.26	3.27	3.28
3.29	3.30	3.31	3.32	3.33	3.34	3.35
3.36	3.37	3.38	3.39	3.40	3.41	3.42
3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.48	3.49
3.50	3.51	3.52	3.53	3.54	3.55	3.56
3.57	3.58	3.59	3.60	3.61	3.62	3.63
3.64	3.65	3.66	3.67	3.68	3.69	3.70
3.71	3.72	3.73	3.74	3.75	3.76	3.77
3.78	3.79	3.80	3.81	3.82	3.83	3.84
3.85	3.86	3.87	3.88	3.89	3.90	3.91
3.92	3.93	3.94	3.95	3.96	3.97	3.98
3.99	4.00	4.01	4.02	4.03	4.04	4.05

Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias
18.43	0.00	6.71

Anexo 18.26. Análisis de varianza y Correlación del Módulo ruptura para ensayos físico-mecánicos en madera deteriorada (compresión paralela a la fibra).

ANÁLISIS DE VARIANZA													
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F							
Entre grupos	28689.28472	12	2390.773726	49.76308905	3.35133E-40	1.83581343							
Dentro de los grupos	5621.044258	117	48.04311331										
Total	34310.32897	129											
Correlación del Módulo ruptura para ensayos físico-mecánicos (compresión paralela a la fibra)													
	V1 Cp	V2 Cp	V3 Cp	V4 Cp	V5 Cp	V6 Cp	V8 Cp	V9 Cp	V10 Cp	V11 Cp	V12 Cp	V13 Cp	V14 Cp
V1 Cp		-3.246	10.790	35.596	16.512	9.710	-6.390	-5.715	-23.327	-2.469	21.031	15.302	20.027
V2 Cp	3.246		14.036	19.758	19.758	12.956	-3.143	-2.469	-20.080	0.777	24.277	18.548	23.274
V3 Cp	-10.790	14.036		24.806	5.723	-1.080	-17.179	-16.504	-34.116	-13.259	10.241	4.512	9.238
V4 Cp	-35.596	-38.842	-24.806		-19.083	-25.885	-41.985	-41.310	-58.922	-38.065	-14.565	-20.293	-15.568
V5 Cp	-16.512	-19.758	-5.723	19.083		-6.802	-22.902	-22.227	-39.839	-18.981	4.518	-1.210	3.515
V6 Cp	-9.710	-12.956	-12.956	25.885	6.802		-16.100	-15.425	-33.037	-12.179	11.320	5.592	10.317
V8 Cp	6.390	3.143	17.179	41.985	22.902	16.100		0.675	-16.937	3.921	27.420	21.692	26.417
V9 Cp	5.715	2.469	16.504	41.310	22.227	15.425	-0.675		-17.612	3.246	26.745	21.017	25.742
V10 Cp	23.327	20.080	34.116	58.922	39.839	33.037	16.937	17.612		20.858	44.357	38.629	43.354
V11 Cp	2.469	-0.777	13.259	38.065	18.981	12.179	-3.921	-3.246	-20.858		23.500	17.771	22.496
V12 Cp	-21.031	-24.277	-10.241	14.565	-4.518	-11.320	-27.420	-26.745	-44.357	-23.500		-5.729	-1.003
V13 Cp	-15.302	-18.548	-4.512	20.293	1.210	-5.592	-21.692	-21.017	-38.629	-17.771	5.729		4.725
V14 Cp	-20.027	-23.274	-9.238	15.568	-3.515	-10.317	-26.417	-25.742	-43.354	-22.496	1.003	-4.725	
		Valor de F		Valor de r		Diferencia de Medias							
		49.76		0.00		10.28							

Anexo 18.27. Análisis de varianza y Correlación del esfuerzo en el límite proporcional para ensayos físico-mecánicos (compresión perpendicular a la fibra)

ANÁLISIS DE VARIANZA													
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F							
Entre grupos	18710.24371	12	1559.186976	79.55751002	2.2279E-50	1.83581343							
Dentro de los grupos	2292.993787	117	19.5982375										
Total	21003.2375	129											
Correlación del esfuerzo en el límite proporcional para ensayos físico-mecánicos (compresión perpendicular a la fibra)													
	V1 Cp	V2 Cp	V3 Cp	V4 Cp	V5 Cp	V6 Cp	V8 Cp	V9 Cp	V10 Cp	V11 Cp	V12 Cp	V13 Cp	V14 Cp
V1 Cp		-0.673	-2.225	7.649	0.375	1.481	4.691	-0.288	9.448	1.955	2.740	45.522	0.572
V2 Cp	0.673		-1.552	1.048	1.048	2.154	5.364	0.385	10.121	2.628	3.413	46.195	1.245
V3 Cp	2.225	-1.552		9.874	2.600	3.707	6.916	1.937	11.673	4.181	4.965	47.747	2.797
V4 Cp	-7.649	-8.322	-9.874		-7.274	-6.167	-2.958	-7.937	1.799	-5.693	-4.909	37.873	-7.077
V5 Cp	-0.375	-1.048	-2.600	7.274		1.106	4.316	-0.663	9.073	1.580	2.365	45.147	0.196
V6 Cp	-1.481	-2.154	-2.154	6.167	-1.106		3.209	-1.769	7.966	0.474	1.259	44.040	-0.910
V8 Cp	-4.691	-5.364	-6.916	2.958	-4.316	-3.209		-4.979	4.757	-2.735	-1.950	40.831	-4.119
V9 Cp	0.288	-0.385	-1.937	7.937	0.663	1.769	4.979		9.736	2.243	3.028	45.810	0.860
V10 Cp	-9.448	-10.121	-11.673	-1.799	-9.073	-7.966	-4.757	-9.736		-7.492	-6.708	36.074	-8.876
V11 Cp	-1.955	-2.628	-4.181	5.693	-1.580	-0.474	2.735	-2.243	7.492		0.785	43.567	-1.384
V12 Cp	-2.740	-3.413	-4.965	4.909	-2.365	-1.259	1.950	-3.028	6.708	-0.785		42.782	-2.169
V13 Cp	-45.522	-46.195	-47.747	-37.873	-45.147	-44.040	-40.831	-45.810	-36.074	-43.567	-42.782		-44.950
V14 Cp	-0.572	-1.245	-2.797	7.077	-0.196	0.910	4.119	-0.860	8.876	1.384	2.169	44.950	
		Valor de F		Valor de r		Diferencia de Medias							
		79.56		0.00		6.57							



Componentes químicos de madera de pino deteriorada de vigas del edificio de la Mitra en Morelia, México

Chemical components of deteriorated pine wood of beams of the Mitra building in Morelia, Mexico

Mayra Irery Carrillo Gómez¹*, David Raya González¹ y Luz Elena A. Ávila Calderón¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
Morelia, Michoacán, México.

* Autora de correspondencia. 9506397x@umich.mx

RESUMEN

Se realizó un análisis para determinar los principales componentes químicos de la madera de tres cabezas de vigas de pino procedentes del área de archivo del edificio histórico conocido como La Mitra, de la ciudad de Morelia, en Michoacán, México. Este análisis es complementario a uno previamente realizado, por medio de ultrasonido y con fines de conservación y restauración de estructuras de carácter histórico. Las vigas que aquí se analizaron forman parte del grupo que se estudió en esa primera fase; seleccionadas de forma aleatoria de un grupo de 40 y con dimensiones de 25 cm × 17 cm × 60 cm. Se tomaron muestras de albura y de duramen en dos secciones distintas (zona de empotramiento deteriorada y sana). Para cada viga se determinaron valores de pH, cenizas, análisis de las cenizas, sustancias extraíbles, holocelulosa y lignina. Los resultados encontrados fueron: pH de 3.20 a 4.67, cenizas 0.25% a 1.36%, con mayor concentración de oxígeno (3.36% a 6.64%), calcio (1.80% a 3.46%), carbono (1.18% a 3.45%), potasio (0.20% a 0.84%), aluminio (0.17% a 0.31%), silicio (0.15% a 0.59%) y magnesio (0.15% a 0.56%); solubilidad en sosa de (9.83% a 27.78%), extraíbles totales, en la extracción secuencial, la mayor solubilidad se obtuvo con acetona, (2.92% a 6.96%), seguido de agua caliente (0.25% a 7.49%), metanol (2.03% a 6.22%) y ciclohexano (0.98% a 2.66%); holocelulosa (68.22% a 84.01%) y lignina (24.19% a 31.83%). El pH, la solubilidad en sosa, la holocelulosa y la lignina presentaron una variación estadística significativa ($P < 0,05$) entre albura y duramen de las zonas sanas y deterioradas.

PALABRAS CLAVE: conservación, extraíbles, holocelulosa, lignina, *Pinus* spp., sustancias inorgánicas.

ABSTRACT

An analysis was carried out to determine the main chemical components of the wood of three pieces of pine beams from the archive area of the historic building known as La Mitra, in the city of Morelia, in Michoacán, Mexico. This analysis is complementary to one previously carried out, by means of ultrasound and for the purpose of conservation and restoration of historical structures. The beams that were analyzed here are part of the group that was studied in that first phase, randomly selected from a group of 40 and with dimensions of 25 cm × 17 cm × 60 cm. Sapwood and heartwood samples were taken in two different sections (decayed and healthy embedment area). For each beam, pH, ashes, ash analysis, extractable substances, holocellulose and lignin values were determined. The results found were: pH from 3.20 to 4.67, ashes 0.25% to 1.36%, with a higher concentration of oxygen (3.36% to 6.64%), calcium (1.80% to 3.46%), carbon (1.18% to 3.45%), potassium (0.20% to 0.84%), aluminum (0.17% to 0.31%), silicon (0.15% to 0.59%), and magnesium (0.15% to 0.56%); solubility in soda (9.83% to 27.78%), total extractables, in the sequential extraction, the highest solubility was obtained with acetone, (2.92% to 6.96%), followed by hot water (0.25% to 7.49%), methanol (2.03% to 6.22%) and cyclohexane (0.98% to 2.66%); holocellulose (68.22% to 84.01%) and lignin (24.19% to 31.83%). The pH, solubility in soda, holocellulose and lignin presented a statistically significant variation ($P < 0.05$) between sapwood and heartwood in healthy and deteriorated areas.

KEYWORDS: conservation, extractives, holocellulose, lignin, *Pinus* spp., inorganic substances.

INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de la madera se conoce como la modificación inevitable (deterioro) de las propiedades químicas, físicas y mecánicas de un material debido a las influencias ambientales, en el curso de un almacenamiento o uso extensivo. Los agentes de degradación más comunes son los organismos que destruyen la madera, la intemperie o la carga a largo plazo de todos los elementos estructurales sujetos a diferentes fuerzas que actúan sobre ellos, es decir, el peso que soportan las vigas de madera a través de los años. Durante el proceso de descomposición de la madera se presenta una cantidad importante de pérdida de masa, rigidez y resistencia. Es necesario monitorear el proceso de descomposición de la madera para garantizar el cumplimiento de sus requisitos estructurales y de seguridad. En el presente estudio se investiga la influencia de los agentes de degradación asociados al envejecimiento natural de una madera mediante la determinación de sus principales componentes químicos.

México es uno de los 162 países que cuentan con lugares denominados como Patrimonio Mundial; es el tercer país con el mayor número de ciudades inscritas en la Lista de Patrimonio (tiene actualmente 10 ciudades, tan solo 6 menos que Italia y 5 menos que España). El estado de Michoacán cuenta con una ciudad denominada Patrimonio de la Humanidad. Las denominaciones son otorgadas previo estudio que califica diferentes puntos, entre los cuales se encuentra su patrimonio arquitectónico; esto les permite acceder a programas que fomentan el desarrollo y la conservación de estos lugares (Consejo Internacional de Monumentos y Sitios [Icomos], 2017).

Debido a la importancia que tiene para la ciudad de Morelia la conservación de su centro histórico, este trabajo resulta útil para varios sectores de la sociedad relacionados con ese tema. Se trata de apoyar al entendimiento y la aplicación de herramientas que contribuyan a la restauración y conservación de los elementos de madera.

De acuerdo con Madrigal Sánchez y Guridi-Gómez (2002), se conocen 20 especies del género *Pinus* en el estado de Michoacán, México; de ellas, 11 se encuentran

en el municipio de Morelia. Algunos estudios referentes a este género han abarcado temas como características anatómicas (AmbrizParra et al., 2002; Ochoa Álvarez, 2003; De la Paz-Pérez Olvera y Dávalos-Sotelo, 2016), propiedades físico-mecánicas (Herrera y Bocanegra, 1996; Ortega-Escalona, 2001; Rojas y Villers, 2005; Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2012) y otras propiedades tecnológicas (Cruz de León y Ambriz-Parra, 2004; Aquino-González et al., 2010).

La variación del contenido de humedad de la madera debido a procesos de adsorción o desorción conduce a cambios dimensionales y puede resultar en daños irreversibles como deformación, agrietamiento o delaminación. Para evitar estos resultados, es deseable proporcionar a las piezas de madera condiciones climáticas estables; sin embargo, no siempre es posible, debido a razones técnicas o financieras. La acción European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research [COST], IE0601, “Ciencia de la madera para la conservación del patrimonio cultural”, aborda este tipo de problemas, teniendo como propósito principal proporcionar información respecto al acondicionamiento climático suficiente para este tipo de maderas y la determinación del alcance de las fluctuaciones climáticas aceptables durante su almacenamiento (Kránitz et al., 2016).

Sin embargo, el proceso de envejecimiento de la madera y las propiedades de la madera envejecida apenas han sido investigados hasta ahora. Además, los resultados de los estudios suelen ser contradictorios y, en general, difíciles para compararlos entre sí, puesto que tanto la especie de madera como la edad de los especímenes varían y a menudo los métodos utilizados también son diferentes.

Los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de la madera a causa del envejecimiento se originan por cambios en la microestructura y por cambios químicos en los componentes. Desde su almacenamiento, las diferentes condiciones determinan qué tipo de procesos químicos pueden ocurrir con un efecto consecuente en el proceso de envejecimiento. Por tanto, se deben identificar las condiciones aeróbicas y anaeróbicas en las que se encuentran (Fengel, 1991).



El comportamiento de la madera y los antecedentes de carga del material deben tenerse en cuenta al investigar el efecto del envejecimiento sobre las propiedades mecánicas. La literatura sobre este comportamiento en la madera es bastante voluminosa (Bodig y Jayne, 1993; Smith et al., 2003).

Si la carga mecánica se combina con cambios en la humedad relativa del aire y con el contenido de humedad de la madera, se produce un efecto llamado mecánico-absorbente. La carga junto con la desorción da como resultado una deformación mayor que la suma de las deformaciones debido a la contracción pura y a la carga pura. A pesar de los numerosos estudios realizados en este tema, el fenómeno aún no ha sido completamente aclarado, debido al alto número de factores (condiciones climáticas, magnitud y duración de la carga, entre otros); (Hunt, 1986; Entwistle y Zadoroshnyj, 2008).

Cavalli et al. (2016) mencionan que la variación de las propiedades mecánicas de la madera debido al envejecimiento es una consecuencia del cambio en su microestructura. Estos autores observaron una disminución en la cantidad de materiales celulósicos y atribuyeron la mayor rigidez de la madera envejecida a la cristalinidad de la celulosa, al observar un incremento en la cristalinidad durante los primeros 100 años, seguido de una disminución progresiva.

Los principales componentes químicos que constituyen las paredes de las células de la madera son celulosa, lignina y hemicelulosas. La celulosa es una macromolécula de carbohidratos que representa de 40% a 45% del peso de la madera, siendo ligeramente superior en maderas de angiospermas que en maderas de gimnospermas (Kránitz et al., 2016).

La composición química de la madera de los pinos mexicanos se ha estudiado para pocas especies. En 2001, Rutiaga Quiñones estimó en madera de albura y duramen de *P. pseudostrabus* la solubilidad en éter de petróleo (0.7% y 4.4%), en acetona (0.7% y 2.8%), en metanol (0.8% y 0.8%), en agua fría (1.0% y 3.7%) y en agua caliente (1.2% y 1.5%); además determinó la lignina Runkel (26.6% y 27.6%) y las cenizas (0.16% y 0.08%), identificando los elementos presentes en estas últimas.

Es conocido que los extraíbles del duramen y de la corteza pueden presentar alta resistencia al biodeterioro; a este respecto se ha encontrado que el extracto metanólico de corteza de Brasil (*Haematoxylon brasiletto*) es inhibidor de bacterias y levaduras; en él se ha identificado hematoxilina, brasilina y ácido gálico como los mayores inhibidores de estos agentes biológicos (Rivero-Cruz, 2008).

Ávila Calderón (2011) estudió los componentes químicos de la madera de *P. pringlei* provenientes de árboles sanos e infectados por muérdago *Psittacanthus macrantherus*. Encontró que los contenidos de sustancias inorgánicas (0.34%), de extraíbles solubles en etanol ciclohexano (0.83%), de extraíbles solubles en agua fría (3.62%) y de holocelulosa (63.58%) resultaron ser mayores en madera sana que en madera plagada (0.31%, 0.67%, 3.09% y 42.82%, respectivamente); por el contrario, la madera infectada presentó valores más altos de solubilidad en sosa (9.87%), de extraíbles solubles en agua caliente (6.22%) y de lignina (28.50%) en relación con la madera sana (8.46%, 5.29% y 23.56%, respectivamente).

Revilla González (2011) estudió algunos aspectos de la química de la madera de *P. cembroides*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana* cuantificando pH (4.09 a 5.63) y cenizas (< 0.6% de las que 90% fueron potasio, calcio y magnesio), encontró además contenidos de extraíbles altos especialmente en el duramen; bajo contenido de celulosa (35.5% a 37.9% determinado por hidrólisis de carbohidratos y 34.8% a 37.1% determinado por deslignificación), alto contenido de lignina (28.8% a 31.5% y 32.6% a 36.4%) y alto contenido de hemicelulosas (29.4% a 32.2% y 28.8% a 30.3%); determinó también las hemicelulosas presentes (glucomanana 15.6% a 20.6% y glucuronoxilana 7.2% a 10.2%).

Ghavidel et al. (2020) consideraron que los ejemplares de abeto de su investigación tenían solo 120 años, por lo que solo se pueden ver pequeñas diferencias con su contraparte de muestra reciente de abeto. También es posible que los procesos de degradación sean bastante lentos en los primeros 120 años y los cambios son demasiado pequeños para ser detectados por los métodos químicos húmedos utilizado en la actualidad (Kránitz et al.,

2016). Las tendencias observadas relacionadas con los compuestos químicos concuerdan bien con la literatura y los resultados de cristalinidad corresponden a la teoría de Kohara y Okamoto (1955).

Dada la poca información que se tiene de los componentes químicos de las maderas mexicanas de pino en condiciones sanas, es aún menor la información en las maderas deterioradas procedentes de edificaciones de tipo colonial, y por eso son necesarios estudios que permitan establecer interrelaciones con propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas de este valioso recurso.

La investigación propone como hipótesis de trabajo que las características químicas de las vigas pueden variar en albura y duramen debido a su degradación por factores biológicos (zonas sanas y deterioradas) y a sus condiciones de uso.

OBJETIVOS

Determinar los componentes químicos básicos de tres cabezas de vigas de madera de pino provenientes del área de archivo del edificio de la Mitra de la ciudad de Morelia, tanto en la zona de albura como de duramen, a través de los análisis de contenido de humedad, pH, contenido de cenizas, extraíbles totales, extraíbles solubles en solventes orgánicos y en agua caliente, contenido de lignina y contenido de holocelulosa, con el propósito de conocer las características químicas de madera sana y deteriorada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta y habilitación del material

Para determinar los principales componentes químicos de la madera de tres cabezas de vigas de pino procedentes de los trabajos de conservación del área de archivo de la Mitra, el material fue analizado previamente de un conjunto de vigas sustituidas (Carrillo et al., 2019; Carrillo y Carreón, 2020; Carrillo y Carreón, 2021). La estrategia experimental de esa investigación consistió en analizar viga por viga una muestra representativa del entramado del techo (Rodríguez-Liñán y Rubio, 1995; Bertoloni Cestari et al., 2010; Branco et al., 2017). En el presente estudio de caso, el factor de variabilidad se limita al género *Pinus* y la estrategia experimental consistió en analizar las zonas empotradas de las vigas del entramado del techo, haciendo una distinción entre la madera de albura y duramen y entre la madera proveniente de distintas ubicaciones a lo largo de la pieza: en el extremo de inicio de la viga y a una distancia de 60 cm del primer punto de muestreo, esto último con el fin de estudiar madera sana y madera deteriorada.

Las porciones estudiadas de las vigas tienen una sección transversal de 25 cm × 17 cm, y fueron divididas en tres piezas de 20 cm de longitud cada una, con base en su grado de deterioro, para obtener la zona 1 (deteriorada), la zona 2 (intermedia) y la zona 3 (sana) como lo indica la figura 1.

Las muestras se analizaron y se clasificaron por áreas de albura y duramen en sus zonas sanas y deterioradas y se consideró la nomenclatura siguiente: albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd).

Del material se obtuvieron tablillas de 1 cm × 6 cm × 10 cm, que fueron astilladas, secadas al aire y molidas en un equipo Wiley. La harina obtenida se clasificó con tamices para el análisis químico y se empleó la fracción que pasó por la malla 40 (425 μm) y que fue retenida en la malla 60 (250 μm). Las determinaciones se realizaron por duplicado.

Las muestras se analizaron y se clasificaron por áreas de albura y duramen en sus zonas sanas y deterioradas y se consideró la nomenclatura siguiente: albura sana (As), albura deteriorada (Ad), duramen sano (Ds) y duramen deteriorado (Dd).

Análisis químico

pH

La determinación del pH (Moisture pH; MpH) se basó en el método de Sandermann y Rothkamm (1959); 2 g de harina de madera sin extraer se colocaron en un vaso de precipitados con 20 ml de agua destilada; se registró el pH inicial, determinado con un potenciómetro marca HANNA y se volvió a registrar 5 min, 4 h, 24 h y 48 h después de la primera medición.



Puntos de extracción del material para pruebas químicas.

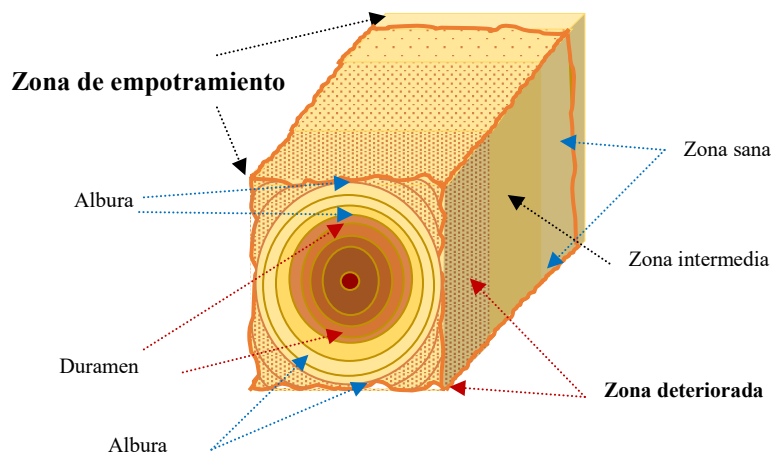


FIGURA 1. Diagrama de las zonas de extracción del material para pruebas químicas.

Cenizas (sustancias inorgánicas)

El contenido de estas sustancias se calculó gravimétricamente después de quemar cuidadosamente 2 g de harina de madera sin extraer en un crisol de níquel, previamente tarado, sobre una placa de calentamiento hasta el cese de desprendimiento de humo, para su posterior calcinación en una mufla a 525 °C; el proceso se dio por concluido cuando el crisol con el material de estudio tuvieron peso constante; el procedimiento y cálculo de las sustancias inorgánicas o cenizas se realizó de acuerdo con la norma T 211 om-93 (Technical Association for the Pulp and Paper Industries [TAPPI], 2000a).

Para la identificación de los elementos presentes en las sustancias inorgánicas se realizó un microanálisis en un espectrómetro de Rayos X, acoplado a un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo JSM- 6400. Las condiciones de operación para los análisis fueron 20 kV y 8.5 segundos, obteniéndose los espectros respectivos en puntos aleatorios.

Solubilidad en sosa

En un matraz, se colocaron 2 g de harina de madera y 100 ml de NaOH a 1.0%; se llevaron a digestión en baño de

agua durante 60 minutos. Se agitó la harina con una varilla de vidrio durante aproximadamente 5 s a los 10 min, 15 min y 25 min después de la colocación en el baño. Al final de la digestión, el material se filtró y se lavó con 100 ml de agua caliente, posteriormente se neutralizó en dos etapas con 25 ml de ácido acético a 10% y se lavó nuevamente con agua caliente hasta dejar el material libre de ácido. Finalmente, el filtro y su contenido se secaron a 105 °C hasta obtener peso constante. El proceso y el cálculo de la solubilidad en sosa se efectuaron siguiendo la norma T 212 om-98 (TAPPI, 2000b).

Sustancias extraíbles

Para determinar la cantidad total de sustancias extraíbles (I), a 6 g de harina de madera se aplicó una extracción sucesiva sólido-líquido en equipo Soxhlet con 200 ml de los solventes siguientes: ciclohexano (CH), acetona (ACE) y metanol (MET); finalmente, agua caliente bajo reflujo (AC). Los periodos de extracción fueron de cuatro horas. Los solventes se recuperaron en un rotavapor aplicando vacío y el extracto respectivo se colocó en un desecador, con gel de sílice como agente desecante, hasta peso constante. El contenido de extraíbles para cada solvente se calculó

dividiendo el peso del extracto bajo estas condiciones entre el peso de la harina anhidra (resultante de los 6 g sometidos a secado a 103 °C), referido porcentualmente. Los extraíbles totales se calcularon sumando los porcentajes de los extraíbles obtenidos con cada solvente. La harina de madera, después de la extracción sucesiva, se designó como harina libre de extraíbles y se empleó para determinar lignina y holocelulosa.

Holocelulosa

Se cuantificó el contenido de holocelulosa empleando clorito de sodio de acuerdo con el procedimiento de Wise et al. (1946). En un vaso de precipitados se vertieron 32 ml de agua destilada a 1 g de harina de madera libre de extraíbles; se adicionaron 0.3 g de clorito de sodio y 2 gotas de ácido acético glacial y la muestra se llevó a un baño de agua a 75 °C. La adición de clorito de sodio y ácido acético glacial, en las cantidades indicadas anteriormente, se repitió cíclicamente cada hora, por un periodo total de 4 horas. Después de la cloración, la solución fue filtrada, lavada con 100 ml de agua fría, seguida de 10 ml de acetona; el residuo fue llevado a un horno convencional a 40 °C hasta peso constante y después se reservó en un desecador. El contenido de holocelulosa se calculó dividiendo el peso del residuo obtenido a 40 °C temperatura entre el peso resultante de la medición de la harina libre de extraíbles sometida al proceso de secado en estufa a 103 °C referido porcentualmente (siendo menor a 1 g debido a la pérdida de sustancias extraíbles).

Lignina

El contenido de lignina en la harina de madera libre de extraíbles se determinó de conformidad con el método TAPPI T 222 om-98 (TAPPI, 2000c), para obtener lignina “Klason”. A la harina libre de extraíbles, se le agregó ácido sulfúrico a 72%, se agitó, posteriormente se dejó reposar por dos horas, pasado ese tiempo, se adicionaron 300 ml de agua destilada y se hizo hervir por 4 horas, a continuación, la muestra se filtró y lavó con agua destilada hirviendo hasta obtener un pH neutro, finalmente, el residuo se llevó a la

estufa para conseguir el peso anhidro. El contenido de lignina se calculó dividiendo el peso de esta muestra anhidra entre el peso de la harina libre de extraíbles anhidra referido porcentualmente.

Análisis estadísticos

Los valores de los componentes químicos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de Tukey para comparar parejas de medias de los tratamientos (albura y duramen sano y deteriorado en cada viga). El valor de probabilidad alfa establecido para calificar como significativas a las diferencias encontradas en las fuentes de variación fue de 0.05. Los resultados obtenidos se procesaron mediante el software Statistica (StatSoft Inc., 2005).

RESULTADOS

Los resultados promedio y la desviación estándar de los componentes químicos para cada una de las cabezas de las vigas de pino estudiadas se muestran en la tabla 1. Las sustancias inorgánicas determinadas por espectroscopia de rayos X se muestran en la tabla 2.

DISCUSIÓN

pH

Los valores de pH obtenidos en este estudio son moderadamente ácidos, encontrándose diferencia significativa ($P < 0.05$) entre las tres vigas y sus zonas de albura y duramen (sano y deteriorado). Los valores más altos de pH se observaron para el caso de (As) en la viga 1 y los valores más bajos se presentaron en la viga 2 (Dd) (Tabla 1). Los valores de pH son muy cercanos a lo registrado para cinco especies de pino mexicanos (4.0 a 4.4) por Bernabé-Santiago et al. (2013) y en albura de seis pinos mexicanos (4.26 a 5.23), de acuerdo con Rutiaga Quiñones (2001) y Revilla González (2011); además, son valores más ácidos que los determinados en pinos europeos (pH de 4.9 a 6.0) por Fengel y Wegener (1989).



TABLA 1. Componentes químicos de tres cabezas de vigas de pino.

Determinación	V1				V2				V3				P
	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd	As	Ad	Ds	Dd	
pH	4.67 (+ 0.17)	3.78 (+ 0.17)	4.14 (+ 0.02)	3.99 (+ 0.02)	3.58 (+ 0.17)	3.58 (+ 0.17)	4.05 (+ 0.02)	3.2 (+ 0.02)	3.88 (+ 0.17)	3.9 (+ 0.17)	3.75 (+ 0.02)	3.61 (+ 0.02)	*
	a b c d	a	a b c d	b c d	a c	a b c	a b c	a b d	a d	c d	b d	a c	
Sustancias inorgánicas 1	0.48 (+ 0.04)	0.43 (+ 0.03)	1.08 (+ 0.19)	1.36 (+ 0.14)	0.4 (+ 0.04)	0.5 (+ 0.43)	0.52 (+ 0.19)	0.51 (+ 0.14)	0.45 (+ 0.04)	0.86 (+ 0.43)	0.25 (+ 0.19)	0.65 (+ 0.14)	*
								d				d	
Solubilidad a la Sosa 1	9.83 (+ 0.52)	22.59 (+ 0.04)	17.18 (+ 0.03)	27.78 (+ 0.16)	18.02 (+ 0.52)	22.59 (+ 0.04)	24.87 (+ 0.03)	27.78 (+ 0.16)	17.04 (+ 0.52)	12.8 (+ 0.04)	17.5 (+ 0.03)	15.43 (+ 0.16)	*
	b c d	a b c d	a b d	a b c d	b c d	a b c	a b c d	a b c	b	a b c d	a b d	a b c d	
Extraíbles totales 1	13.42 (+ 0.25)	16.43 (+ 0.25)	17.51 (+ 0.3)	15.25 (+ 0.3)	8.2 (+ 0.25)	14.28 (+ 0.25)	21.85 (+ 0.3)	16.81 (+ 0.3)	10.36 (+ 0.25)	12.75 (+ 0.25)	14.48 (+ 0.3)	15.48 (+ 0.3)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a c d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	c d	a b c d	b c	
Ciclohexano 1	0.98 (+ 0.07)	1.2 (+ 0.07)	1.35 (+ 0.05)	1.99 (+ 0.05)	1.4 (+ 0.07)	1.34 (+ 0.07)	2.57 (+ 0.05)	2.66 (+ 0.05)	1.47 (+ 0.07)	1.42 (+ 0.07)	1.76 (+ 0.05)	1.54 (+ 0.05)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	b c	a c d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	c d	a c d	c d	
Acetona 1	2.92 (+ 0.32)	3.78 (+ 0.32)	5.01 (+ 0.23)	3.45 (+ 0.23)	3.2 (+ 0.32)	3.65 (+ 0.32)	6.96 (+ 0.23)	7.93 (+ 0.23)	3.52 (+ 0.32)	4.07 (+ 0.32)	3.43 (+ 0.23)	3.49 (+ 0.23)	*
	b c d	b c d	b c	a b c d	b d		b c d	a b c d	a	a b c d	b	b d	
Metanol 1	3.68 (+ 0.4)	3.96 (+ 0.4)	4.15 (+ 0.33)	4.38 (+ 0.33)	3.35 (+ 0.4)	4.25 (+ 0.4)	6.22 (+ 0.33)	5.55 (+ 0.33)	2.03 (+ 0.4)	3.12 (+ 0.4)	3.37 (+ 0.33)	3.19 (+ 0.33)	*
	a c	c	a c	a b c d		a	a b c d	a c d	a	a b	b	c d	
Agua caliente 1	6.14 (+ 0.24)	7.49 (+ 0.24)	7.00 (+ 0.4)	5.43 (+ 0.4)	0.25 (+ 0.24)	5.04 (+ 0.24)	6.10 (+ 0.4)	0.67 (+ 0.4)	3.34 (+ 0.24)	4.14 (+ 0.24)	5.92 (+ 0.4)	7.26 (+ 0.4)	*
	a b c	a b d	a b c	a b c d	a b c d	a b c d	a b c	b c	a b c d	a b	a b d	b c	
Holeocelulosa 2	82.08 (+ 0.5)	76.17 (+ 0.5)	69.75 (+ 0.35)	79.42 (+ 0.35)	75.49 (+ 0.5)	69.27 (+ 0.5)	68.22 (+ 0.35)	84.01 (+ 0.35)	78.58 (+ 0.5)	83.25 (+ 0.5)	83.25 (+ 0.35)	80.94 (+ 0.35)	*
	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	a b c d	
Lignina 2	24.37 (+ 1.4)	29.02 (+ 1.4)	27.89 (+ 0.6)	31.83 (+ 0.6)	24.19 (+ 1.4)	27.65 (+ 1.4)	28.54 (+ 0.6)	30.58 (+ 0.6)	31.61 (+ 1.4)	26.13 (+ 1.4)	29.40 (+ 0.6)	30.39 (+ 0.6)	*
	c d	a b	a d	b c d	a b d	a	d	a b c d	a b c d	a b c d	a	c d	

Se muestra la media (desviación estándar). P = probabilidades en ANOVA con un factor (zona de muestreo).

1: Componentes en porcentajes basados en el peso anhidro. 2: Componentes en porcentaje basados en el peso anhidro libre de extraíbles.

*: P < 0.05, ns: P > 0.05. Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas (Tukey, P < 0.05).

Las letras minúsculas representan la comparación entre las zonas de As, Ad, Ds y Dd en cada una de las tres vigas (columnas), los valores con la misma letra indican que no existe diferencia significativa (P > 0.05).

Tabla 2. Sustancias inorgánicas (en porcentaje) en albura y duramen de las vigas 1, 2 y 3.

Elemento	Viga 1 (%)				Viga 2 (%)				Viga 3 (%)			
	VI As	VI Ad	VI Ds	VI Dd	V2 As	V2 Ad	V2 Ds	V2 Dd	V3 As	V3 Ad	V3 Ds	V3 Dd
Carbono	1.18	1.72	3.24	2.39	1.36	1.69	0.41	3.45	3.40	1.69	1.48	2.26
Oxígeno	4.72	5.49	6.47	5.76	4.90	5.10	3.36	6.64	4.74	5.10	3.58	4.02
Magnesio	0.48	0.51	0.47	0.49	0.30	0.56	0.37	0.46	0.15	0.56	0.17	0.15
Aluminio	nd	nd	0.31	nd	0.17	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Silicio	nd	nd	0.59	nd	nd	0.15	0.31	0.18	nd	nd	nd	nd
Potasio	0.42	0.38	0.54	0.40	0.49	0.48	0.20	0.55	0.40	0.48	0.84	0.59
Calcio	3.19	3.03	2.53	3.04	2.68	3.46	3.05	2.41	2.35	3.46	1.80	2.03

Nd = no detectado; As = albura sana; Ad = albura dañada; Ds = duramen sano; Dd = duramen dañado.

Esta variación se debe a que el grado de acidez de la madera se ve afectado por la localización en el árbol de la muestra analizada, la estación, los factores climáticos, la cantidad y el tipo de extraíbles, y por la presencia de grupos ácidos y ácidos libres (Bernabé-Santiago et al., 2013).

El pH moderadamente ácido en las maderas en estudio puede afectar su utilización; al estar en contacto con metales puede causar corrosión; también se puede ver afectada la fijación de sustancias preservantes, el fraguado de los adhesivos, la fabricación de tableros y productos plásticos y el proceso de pulpeo (Fengel y Wegener, 1989; Poblete et al., 1991; Poblete y Roffael, 2004; Sandermann y Rothkamm, 1959).

Cenizas

El contenido de sustancias inorgánicas en las muestras se encuentra entre 0.25% y 1.36% y no se encontró diferencia significativa en esta determinación. Los resultados se encuentran dentro del intervalo indicado por Revilla González (2011) para cinco especies de pinos mexicanos (0.39% a 0.52%) y por Bernabé-Santiago et al. (2013); 0.30%. También, los resultados se aproximan a los obtenidos para *P. sylvestris* (0.27%; Balaban y Yilgör, 1995)

y para *P. pringlei* (0.34%; Ávila Calderón, 2011), pero son mayores a los encontrados en duramen (0.08%) y en albura (0.16%) en *P. pseudostrobus* (Rutiaga Quiñones, 2001) y al intervalo porcentual (0.1% a 0.8%) registrado para algunas especies de pino extranjeras (Fengel y Wegener, 1989; González Pimentel, 2005; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006). Para algunas maderas europeas de pino de edad reciente se presentan valores de 0.26% a 0.30%, en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años de 0.27% a 0.40% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

El resultado del microanálisis de las cenizas, mediante rayos X, indica que los elementos encontrados en mayor proporción son oxígeno, calcio, carbono, potasio, aluminio, silicio y magnesio (Tabla 2); estos elementos son los principales componentes de las sustancias inorgánicas en la madera (Fengel y Wegener, 1989); también, registrados en otros pinos mexicanos, en ese orden de importancia (Rutiaga Quiñones, 2001; Revilla González, 2011), mientras que en algunos estudios es mayor la proporción de magnesio que potasio en *P. pringlei* (Ávila, 2011).

En este estudio, el silicio solo se encontró en la muestra Ds de la viga 1 y en tres muestras (As, Ds, y Dd) de la viga 2 (Tabla 2). Algunos autores consideran que una



concentración de silicio entre 1.0% y 3.0% representa problemas para la transformación de la madera, principalmente, en el desafilado de las herramientas de corte (Honorato Salazar y Hernández Pérez, 1998) y, específicamente, en la rapidez de desafilado en la sierra banda (Kirolov, 1980). No obstante, la cantidad de este elemento químico detectada en las maderas en estudio puede considerarse de bajo impacto en el desafilado de herramientas de corte al procesar este material.

Solubilidad en sosa

Los resultados obtenidos muestran que la muestra As de la viga 1 presenta el menor porcentaje de solubilidad en sosa. Los resultados indicaron que existe una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) con respecto a las otras muestras: se observó que hay una mayor solubilidad en las muestras de madera deteriorada Ad y Dd en las vigas 1 y 2 que en las de madera sana As y Ds en la viga 2 siendo estas últimas las que presentaron los valores más altos. Los valores en duramen siempre fueron mayores que en la albura independientemente de la viga a la que perteneciera la muestra (Tabla 1). Los valores obtenidos para todas las vigas en estudio están en entre 9.83% y 27.78% y se asemejan a los mencionados en la literatura para diferentes especies de pino (11% a 16%; Rowell, 2005; Ávila Calderon y Rutiaga Quiñones, 2014) y en el intervalo de 17.9% a 25.4% observado por Bernabé-Santiago et al., (2013).

Los extraíbles solubles en sosa pueden ser carbohidratos de bajo peso molecular, principalmente hemicelulosas, estos están relacionados con el grado de pudrición por hongos o el deterioro por calor, luz u oxidación (TAPPI, 2000b; Bernabé-Santiago et al., 2013).

Sustancias extraíbles

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 1), se presentó diferencia significativa entre los extraíbles para los diferentes solventes (8.2% a 21.85%) (ciclohexano, acetona, metanol, agua caliente), entre madera sana y deteriorada, y entre albura y duramen de las tres vigas. La mayor solubilidad de la madera se logró con acetona, seguida de

agua caliente y metanol; los menores valores se obtuvieron con ciclohexano.

Los rendimientos alcanzados son mayores a los observados por otros autores para especies de pino (2.4% a 7.7%; Fengel y Wegener, 1989; Rodríguez, 2005; Fonseca, 2006) y similares a los calculados para *P. oocarpa* (10.89%; González Pimentel, 2005), en duramen de *P. pseudostrobus* (13.2%; Rutiaga Quiñones, 2001) y en albura y duramen de *P. cembroides*, *P. maximartinezii*, *P. johannis* y *P. pinceana* (11.5% a 33.7%; Revilla González, 2011). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan valores de 1.38% a 11.96%, en tanto que para maderas europeas de alrededor de 120 años va de 1.34% a 2.95% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

La relación entre el contenido de extraíbles y las propiedades físicas y tecnológicas dependen del contenido de extraíbles, de su tipo y de su localización; por un lado, en algunas especies pueden aumentar la estabilidad dimensional y la resistencia mecánica; por el otro, pueden disminuir el punto de saturación de la fibra y el contenido de humedad en equilibrio y afectar otras propiedades tecnológicas (Poblete et al., 1991; Ávila Calderón y Herrera Ferreyra, 2012).

Holocelulosa

Se encontró diferencia significativa ($P < 0.05$) en el contenido de holocelulosa en las tres vigas y en las zonas sana y deteriorada (Tabla 1). Los valores determinados se encuentran muy cercanos lo encontrado en la literatura para maderas de coníferas (64.0% a 82.5%; Fengel y Wegener, 1989; Rowell, 2005). En algunos casos se han publicado resultados para pinos mexicanos con valores de entre 68.1% y 74.7% (Bernabé-Santiago et al., 2013) y de 63.6% a 68.7% (Rutiaga Quiñones, 2001; Ávila Calderón, 2011; Revilla González, 2011). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan 35.34% a 53.016% para celulosa y 20.98% a 32.31% para hemicelulosa; en tanto que, para maderas europeas de alrededor de 120 años, 49.03% a 56.43% para celulosa y 19.32% a 29.44% para hemicelulosa (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

Lignina

El valor más alto de lignina Runkel fue observado en la viga 1 en la zona Dd y el valor menor en la viga 2 en la zona As, con diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) respecto a las muestras de albura y duramen (Tabla 1). Los valores de lignina aquí obtenidos concuerdan con los observados en madera de pinos michoacanos como *P. leiophylla* (28.5 %; Bernabé-Santiago et al., 2013), en duramen y albura de *P. pseudostrabus* (27.6% y 26.6%, respectivamente; Rutiaga Quiñones, 2001) y en madera de otras especies de pinos mexicanos (23.6% a 31.2%; Ávila Calderón, 2011; Revilla González, 2011); igualmente, son similares a otros obtenidos para maderas de pino de origen extranjero (22.0% a 35.0%; González Pimentel, 2005; Rodríguez, 2005; Rowell, 2005; Fonseca, 2006). Para algunas maderas europeas de edad reciente se presentan valores de 28.14% a 31.62%; y para esas mismas especies europeas de alrededor de 120 años de 29.90% a 31.27% (Kránitz et al., 2016; Ghavidel et al., 2020).

Se conoce que el contenido de lignina desempeña un papel importante en el comportamiento de la madera ante los cambios dimensionales por variaciones en el contenido de humedad (Bárcenas-Pazos y Dávalos-Sotelo, 1999); así, la baja contracción máxima (radial 1.6%, tangencial 2.0%) encontrada por Herrera Ferreyra y Bocanegra Ojeda (1996) para la madera de *P. leiophylla*, en comparación con la relativamente alta publicada por ellos mismos para las maderas de *P. montezumae* (radial 5.0%, tangencial 6.6%) y *P. oocarpa* (radial 3.3%, tangencial 4.4%) y por Sotomayor-Castellanos et al. (2010) para *P. michoacana* (radial 3.1%, tangencial 6.9%) pudiera explicarse por su alto contenido de lignina.

El resultado de los cambios estructurales a nivel molecular, cuando la madera se somete a carga, es una reorientación de sus moléculas. A niveles de esfuerzos más altos, se produce deslizamiento y posteriormente se destruyen los enlaces químicos, lo que resulta en daños estructurales irreversibles y se reduce la resistencia mecánica. Los factores importantes que influyen en el comportamiento de la fluencia son el nivel, la duración y el tipo de carga. Cuando no hay suficiente tiempo para total recupe-

ración, la deformación por fluencia se acumulará a lo largo de los ciclos, lo que provocará nuevamente un daño irreversible en el material. Existen estudios que contemplan análisis más complejos con los cuales es posible pronosticar la edad de este material con base en la degradación de sus elementos constituyentes (Ghavidel et al., 2020).

Esta investigación forma parte de diversos estudios en los cuales se efectuaron ensayos no destructivos y ensayos físico-mecánicos, en campo y laboratorio permitiendo la realización de diagnósticos en estructuras de la madera de edificaciones pertenecientes al Patrimonio Histórico construido en madera, con el fin de conocer sus propiedades físico-mecánicas para su restauración y conservación (Carrillo, 2022; Carrillo y Carreón, 2019; Carrillo y Carreón, 2020; Carrillo y Carreón, 2021; Carrillo et al., 2018a; Carrillo et al., 2020; Carrillo et al., 2018b; Carrillo et al., 2019).

Finalmente, los resultados del análisis indican que estas vigas podrían tener una antigüedad entre los 100 y los 150 años. Este intervalo de edad se determinó con base en otros estudios sobre componentes químicos de maderas de reciente corta y maderas recuperadas de edificaciones restauradas o renovadas, en las cuales es posible saber el periodo de vida útil (Kránitz et al., 2014; Kránitz et al., 2014; Kránitz et al., 2016).

En México se está comenzando con este tipo de estudios a maderas estructurales históricas y este trabajo se suma a los ya existentes internacionalmente con las peculiaridades de las especies mexicanas.

CONCLUSIONES

Se determinaron los componentes químicos básicos de las tres cabezas de vigas de madera de pino del edificio de La Mitra de la ciudad de Morelia, tanto en la zona de albura como de duramen de madera sana y deteriorada. Se cumple así con el objetivo planteado en esta investigación a través de los análisis de contenido de humedad, pH, contenido de cenizas, extraíbles totales, solubles en solventes orgánicos y en agua caliente, contenido de lignina y contenido de holocelulosa, contribuyendo al conocimiento químico de los pinos del país. La composición química básica de las



muestras estudiadas coincide en general con datos de la literatura para maderas de pino mexicanas y extranjeras.

El pH, la solubilidad en sosa, la holocelulosa y la lignina presentaron una variación estadística significativa ($P < 0,05$) entre albura y duramen en las zonas sanas y deterioradas. No obstante, el análisis químico de todas las muestras de madera indica que las vigas estudiadas presentan valores de porcentajes de ceniza, de extraíbles, de holocelulosa y de lignina que permiten concluir que la madera estudiada aun no presenta degradaciones importantes en su composición química, por lo que pueden ser detectadas también sus propiedades físico-mecánicas por medio de técnicas no destructivas, tales como la aplicación de técnicas de ultrasonido.

RECONOCIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por el Conacyt y por el Programa de Doctorado Ciencias y Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Madera, de la Universidad San de Michoacán Nicolás de Hidalgo, en Morelia, Michoacán, México. Los autores agradecen el apoyo brindado para esta investigación a las autoridades de la Catedral Metropolitana de Morelia (Presbítero Humberto González Correa, Custodio del Edificio de la Santa Mitra de la Catedral Metropolitana de Morelia) y a la Comisión de Arte Sacro de la Arquidiócesis de Morelia por el apoyo y la donación del material para esta investigación.

REFERENCIAS

- Ambriz Parra, J. E., Guridi-Gómez L. I., Martínez-Sánchez, G. I., & Ochoa-Álvarez, T. (2002). Anatomía de la madera e índices de calidad de pulpa de dos variedades de pino lacio (*Pinus michoacana* var. *michoacana* Martínez y *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez), de un bosque de Pino-encino del municipio de Morelia, Michoacán, México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 7, 2-16.
- Aquino-González, L. V., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L. L., & Sandoval-Torres, S. (2010). Evaluación de programas de secado para madera de chalamite (*Pinus pseudostrobus*). *Madera y Bosques*, 16(2), 35-46. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1621171>
- Ávila Calderón, L. E. A. (2011). Evaluación de los componentes químicos básicos de la madera de *Pinus pringlei* infectada por el muérdago *Psittacanthus macrantherus*. *Ciencia Nicolaita*, 54, 7-16.
- Ávila Calderón, L. E. A., & Herrera Ferreyra, 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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000200013>
- Ávila Calderón, L. E. A., & Rutiaga Quiñones, J. G. (2014). Componentes químicos de la madera y la corteza de *Haematoxylum brasiletto* Karsten (Leguminosae). *Maderas y Bosques*, 20(2), 153-158. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202171>
- Balaban, M., & Yilgör, N. (1995). The acidity of hardwoods and softwoods grown in Turkey. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53(5), 332. <https://doi.org/10.1007/s001070050101>
- Bárceñas-Pazos, G., & Dávalos-Sotelo, R. (1999). Efecto de la lignina en las contracciones de la madera: revisión bibliográfica. *Madera y Bosques*, 5(1), 13-26. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.511351>
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L. E. A., & Rutiaga-Quñones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, 19(2), 21-35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>
- Bertoloni Cestari, C., Cestari, L., Corradino, G., Luca, D., Crivellano, A., Marzi, T., & Panosch, P. (2010). Hidden architecture. Restoration of historic timber structures: the great roof structures of the Cathedral of Vercelli. En M. C. Forde (Ed.), *Structural Faults & Repair 2010: 13th International Conference and Exhibition Edinburgh, UK, 15 th 17th June 2010* (pp. 1-12). Engineering Technics.
- Branco, J. M., Sousa, H. S., & Tsakanika, E. (2017). Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests, and local interventions on two historic timber collar roof trusses. *Engineering Structures*, 140, 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.053>
- Bodig, J., & Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of wood and wood composites*. Krieger Publishing Company.
- Carrillo G., M. I. (2022). Comparación del módulo de young empleando técnicas no destructiva y destructiva en madera de recuperación in situ y laboratorio. En 19° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales (Vol. 19, pp. 330-340). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2019). Ultrasonic determination of the elastic and shear modulus on aged wood. En A. L. Gyekenyesi, T. Y. Yu, H. F. Wu, & P. J. Shull (Eds.), *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil*

- Infrastructure, and Transportation XIII* (Vol. 10971, pp. 523-52). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2513294>
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2020). Study of the degradation effects on aged wood beams from the Cathedral of Morelia, Mexico by acoustic birefringence measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56(12), 1042-1049. <https://doi.org/10.1134/S1061830921010034>
- Carrillo, M., Carreón, H., & Raya G., D. (2020). Determination of the acoustic anisotropy on a recent and aged mexican pine wood by ultrasound. En T. Y. Yu, H. F. Wu, P. J. Shull, & A. L. Gyekenyesi (Eds.), *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIV* (Vol. 11380, pp. 227-232). <https://doi.org/10.1117/12.2557085>
- Carrillo G., M. I., & Carreón G., H. G. (2021). Determination of the ultrasonic velocity on a recent and aged pine wood. En T. Kundu, H. Reis, J. B. Ihn, & Y. Dzenis (Eds.), *48th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (V001T21A001). ASME. <https://doi.org/10.1115/QNDE2021-74998>
- Carrillo G., M. I., Carreón G., H. G., & Cruz L., J. (2018a). *Estudio microestructural de madera de Pinus pseudostrubus sana y deteriorada*. En 14° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales (Vol. 14, pp. 231-239). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., Cruz L., J., & Carreón G., H. G. (2018b). *Mediciones de la velocidad ultrasónica en madera de pino sana y deteriorada*. En 15° Foro de Ingeniería e Investigación en Materiales. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales (Vol. 15, pp. 356-362). Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Carrillo G., M. I., Sotomayor C., J. R., & Raya G., D. (2019). Structural analysis of wood beams by non-destructive methods in restoration works of the Cathedral of Morelia, Mexico. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XLII-2/W15, 263-270). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-263-2019>.
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., & Sousa, H. S. (2016). A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. *Construction and Building Materials*, 114, 681-687.
- European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research [COST] (2006). *Memorandum of Understanding (MoU) for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action IE0601: Wood Science for Conservation of Cultural Heritage (WoodCultHer)*. COST. <https://www.cost.eu/actions/IE0601/>
- Cruz de León, J., & Ambriz-Parra, J. E. (2004). Impregnación de madera en autoclave con sales de cobre, cromo y arsénico por el método Bethell. *Ciencia Nicolaita*, 37, 177-188.
- Entwistle, K. M., & Zadoroshnyj, A. (2008). The recovery of mechano-sorptive creep strains. *Journal of Materials Science*, 43(3), 967-973. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2138-0>
- Fengel, D. (1991). Aging and fossilization of wood and its components. *Wood Science and Technology*, 25(3), 153-177. <https://doi.org/10.1007/BF00223468>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter de Gruyter.
- Fonseca, M. (2006). *Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (Pinus maximinoi H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Ghavidel, A., Scheglov, A., Karius, V., Carsten, M., Tarmian, A., Vasilache, V., & Sandu, I. (2020). In-depth studies on the modifying effects of natural ageing on the chemical structure of european spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*) woods. *Journal of Wood Science*, 66(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01924-w>
- González Pimentel, M. R. (2005). *Determinación de la composición química de la madera del pino ocote (Pinus oocarpa Schiede ex Schltdl) procedente de plantación en Cucanjá, Tukurá, Alta Verapaz* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Herrera Ferreyra, M. A., & Bocanegra Ojeda, S. (1996). Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 1, 3-11.
- Honorato Salazar, A., & Hernández Pérez, J. (1998). Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. *Madera y Bosques*, 4(2), 79-93. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421361>
- Hunt, D. G. (1986). The mechano-sorptive creep susceptibility of 2 softwoods and its relation to some other materials properties. *Journal of Materials Science*, 21(6), 2088-2096. <https://doi.org/10.1007/BF00547951>
- Consejo Internacional de Monumentos y Sitios [Icomos] (2017). Principios para la Conservación del Patrimonio construido en madera. Icomos.
- 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, 925-936. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0103-8>



- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., & Niemz, P. (2016). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), 7-22. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0>
- Kirlov, A. (1980). Toward the re-appraisal of the influence of basic wood characteristics on sawblade potential. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 38(4), 145-149. <https://doi.org/10.1007/BF02612681>
- Kohara, J., & Okamoto, H. (1955). Studies of Japanese old timbers. *Scientific Reports of the Saikyo University (Agriculture) Kyoto*, 7(1), 9-20.
- Madrigal Sánchez, X., & Guridi-Gómez, L. I. (2002). Los árboles silvestres del municipio de Morelia, Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita*, 33, 29-58.
- Ochoa Álvarez, M. T. (2003). *Características anatómicas mesurables e índices de calidad de pulpa de la madera de 11 especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán* (Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo).
- Ortega-Escalona, E. (2001). Densidad básica y longitud de traqueidas en la madera de cinco familias de *Pinus patula* Schtdl. & Cham. en dos sitios del estado de Veracruz, México. *Ciencia y Tecnología de la Madera*, 2(5), 21-41.
- de la Paz-Pérez Olvera, C., & Dávalos-Sotelo, R. (2016). Anatomía de la madera de seis especies de *Pinus* (Pinaceae) del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 22(3), 113-132. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231460>
- Poblete, H., Rodríguez, S., & Zárate, M. (1991). *Extraíbles de la madera, sus características y efectos sobre la utilización de esta materia prima*. Universidad Austral de Chile.
- Poblete, H., & Roffael, E. (2004). Acidez de la corteza de algunas especies nativas chilenas. *Bosque*, 25(3), 73-78. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002004000300008>
- Revilla González, E. (2011). *Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección cembroides* (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo).
- Rivero-Cruz, J. F. (2008). Antimicrobial compounds isolated from *Haematoxylon brasiletto*. *Journal of Ethnopharmacology*, 119(1), 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.06.005>
- Rodríguez-Liñán, C., & Rubio H., P. (1995). Evaluación del estado de la madera en obras de rehabilitación mediante técnicas de ultrasonidos y obtención de parámetros resistentes. *Informes de la Construcción*, 47(440), 5-22.
- Rodríguez L., M. E. (2005). *Determinación de los componentes químicos de la madera de pino blanco (Pinus pseudostrobus Lindl.) proveniente de la finca Las Victorias, Patzún, Chimaltenango* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala).
- Rojas G., F., & Villers R., L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11(1), 63-71. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111262>
- Rowell, R. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Taylor & Francis.
- Rutiaga Quiñones, J. G. (2001). *Chemische und biologische Untersuchungen zum Verhalten dauerhafter Holzarten und ihrer Extrakte gegenüber holzabbauenden Pilzen*. Buchverlag Gräffelfing.
- Sandermann, W., & Rothkamm, M. (1959). Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz Roh- und Werkstoff*, 17, 433-440. <https://doi.org/10.1007/BF02605386>
- Silva-Arredondo, F. M., & Nívar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811139>
- Smith, I., Landis, E., & Gong, M. (2003). *Fracture and fatigue in wood*. John Wiley & Sons.
- Sotomayor-Castellanos, J. R., García Mariscal, L. J., & Moya-Lara, C. E. (2010). 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.
- StatSoft Inc. (2005). *Sistema de software de análisis de datos STATISTICA*, versión 7.1. <http://www.statsoft.com>
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000a). *T 211. om-93 Ash in wood, pulp, paper, and paperboard: combustion at 525°C*. TAPPI Press.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000b). *T 212. om-98 One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp*. TAPPI Press.
- Technical Association for the Pulp and Paper Industries (TAPPI) (2000c). *T 222. om-98 Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.
- Wise L. E., Murphy, M., & D'Addieco, A. A. (1946). Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper. Trade Journal*, 122(2), 35-43.

Manuscrito recibido el 04 de junio de 2021

Aceptado el 31 de enero de 2023

Publicado el 09 de mayo de 2023

Este documento se debe citar como:

Carrillo Gómez, M. I., Raya González, D., & Ávila Calderón, L. E. A. (2023). Componentes químicos de madera de pino deteriorada de vigas del edificio de la Mitra en Morelia, México. *Madera y Bosques*, 29(1), e2912372. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912372>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.

STRUCTURAL ANALYSIS OF WOOD BEAMS BY NON-DESTRUCTIVE METHODS IN RESTORATION WORKS OF THE CATHEDRAL OF MORELIA, MEXICO

M. I. Carrillo Gómez^{1*}, J. R. Sotomayor Castellanos¹, D. Raya González¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México - (mayrairery, rayadavid)@gmail.com, - mader999@yahoo.com

Commission II, WG II / 8

KEY WORDS: Humidity content, density, wave velocity, stress waves, dynamic modulus, structural rigidity (stiffness)

ABSTRACT:

In the ceiling framework of the capitular hall of the Cathedral of Morelia, the overall state of the beams of the ceiling framework of the capitular hall of the Cathedral of Morelia was diagnosed as deplorable, for which a replacement was put underway for more recently sawed beams. The focus of this investigation was to determine the humidity content of the wood, its density, the wave velocity, the dynamic modulus and the quality factor of a sample of five new beams. These parameters were compared to the medium of five old beams. For the density, wave velocity, dynamic modulus and rigidity, there were no differences found between the old and new beams. The results suggest that the mechanical and physical properties of the new wood beams are equivalent to those of the older ones. Consequently, the strategy of substituting old and deteriorated wood beams for recently sawed ones was successful and complies with the requirements of the International Council of Monuments and Sites as referred to in the principles for the preservation of historical wooden structures.

1. INTRODUCTION

One strategy in the restoration works of wood ceilings in historical edifications is the substitution of antique wood beams for equivalent structural elements, for recently sawed wood of the same species, which has the mechanical quality and resistance of the wood beams to be substituted (Croatto and Turrini, 2014). This reconstruction of a technical character, requires the convenient rigor to guarantee the safety of the user and the stability of the edification while respecting the aesthetic and environmental aspects of the timber (Worthing and Dann, 2000).

Among the buildings which integrate the artistic heritage of the city of Morelia, the Metropolitan Cathedral of Morelia stands out, located in the capital of the state of Michoacan, Mexico (1660 – 1744). It was designed by the Italian architect Vicencio Barroso de la Escayola, in a style typified by the experts as Baroque. It is dedicated to the Transfiguration of the Lord, the vice regal administration and the New Spanish ecclesiastical hierarchy considered it as the most ambitious project of the colonial territory for that century (Gonzalez, 2006).

The bishop and the Michoacan capitulars foresaw towards 1765, integrated to the southern wall of the temple, the building in which all administrative activity related to diocesan regulation would take place. This construction, known as The Mitra, would house the offices of the secretary of ecclesiastic government, the treasure hall and the agencies related to archives; within its solid walls, its elliptical dome, which crowns the staircase and the two-level archery that defines the façade (Aguilera, 2016).

In this area of the Cathedral known as The Mitra, during the restoration works, the state of the wood beams holding the framework of the roof of one of the office rooms of the capitular hall was diagnosed as deplorable. Consequently, they were replaced by recently sawn wood beams (Figure 1). From a holistic point of view, the requirement for structural resistance must be met; that is to say, the characteristics of the new wood beams must

be equivalent to those of the beams which have been taken down (Sousa *et al.*, 2016).

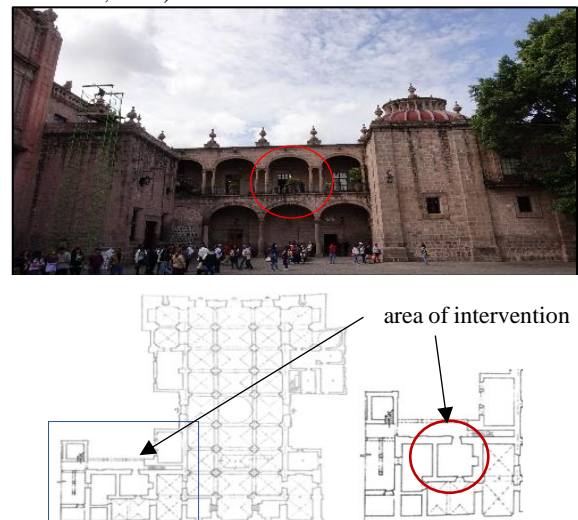


Figure 1. Facade and architectural plan of the Metropolitan Cathedral of Morelia and the building of La Mitra. Taken from the file sent to UNESCO to register the Historic Center of Morelia in the List of Cultural Heritage of Humanity, 1990. Copy protected by the Municipal Historical Archive of Morelia. (Aguilera, 2016)

The current investigation proposes as a work hypothesis, that the physical and mechanical characteristics of the new beams are similar to those of the old beams, by which the exchange of the new beams for the older ones assures the structural stability of the new roof. The technology used in this investigation is that of stress waves, a non-destructive method which has proved its efficiency for the mechanical characterization of structural elements of wood (Li *et al.*, 2015; Dahle *et al.*, 2016; Kloiber *et al.*, 2016; Chen and Guo, 2017). This focus is complementary to other techniques and methods to assure the structural reliability of wood edifications with historical and cultural value (Machado

M. I. Carrillo Gómez^{1*}

et al., 2011; Kránitz *et al.*, 2014; Arangjelovski *et al.*, 2015; Feio and Machado, 2015; Henriques and Neves, 2015; Kloiber *et al.*, 2015; Sousa *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Cavalli *et al.*, 2016a; Cavalli *et al.*, 2016b; Milch *et al.*, 2016; Sousa *et al.*, 2017; Barozzi *et al.*, 2018; Walsh-Korb and Avérous, 2018).

The objective of the investigation was to determine the humidity content of the wood, its density, the wave velocity, the dynamic modulus and the quality factor of a representative sample of the old beams in order to compare these parameters to the medium in the old beams. The investigation aims to assess the technique of non-destructive character of stress waves in the evaluation of the mechanical strength in old and new beams (Íñiguez-González *et al.*, 2015). In order to achieve this, we propose modeling the wood as an elastic material, macroscopically homogeneous with a material and elastic orthotropy.

2. METHODOLOGY

The experimental strategy of this investigation consisted of analyzing a representative beam by beam sample of the roof framework (Cestari *et al.*, 2010; Branco *et al.*, 2017). In this case study, the variability factor is limited to the genus *Pinus* and to the comparison of two representative samples of sawn wood from trees originating from ecologically similar regions. To simplify the analysis, the influence of weathering and the conditions of service to which the old wood was exposed, is considered minimal.

On the other hand, the influence of the characteristics of tree growth is considered minimal, from which the two sets of beams in their technological properties come. Thus, for the group of old beams, the segment of the beam that does not indicate severe deterioration was studied, corresponding to the segment of the beam exposed in the room that does not show deterioration, and the two segments embedded in the walls were eliminated.

Similarly, during experimentation, the temperature and humidity in the wood were kept constant and evenly distributed spatially. In the same context, in order to simplify the phenomenon and to interpret the measurements of the wave velocity, the effect of the damping of the mechanical wave was excluded and idealized as if it were traveling in a single and unique direction.

2.1 Material. Five new beams (NB) and five old beams (OB) of genus *Pinus* were analyzed. The genus of wood was identified at the macroscopic level in the Laboratory of Wood Mechanics, of the Faculty of Engineering in Wood Technology, of the Michoacán University of San Nicolás de Hidalgo. The old beams were selected from a set of twenty beams extracted during the restoration works of the roof of the chapter house of the Cathedral of Morelia (Figure 2). The new beams were acquired in sawmills from the state of Michoacán, Mexico.



Figure 2. Old beams of the roof framework

The old beams were exposed on three sides to the environment of an interior ceiling and it is estimated that their service period was 50 years. Significant deterioration was visible in the ends that were embedded (Figure 3), therefore, the observations were made in the central segment with wood free of deterioration.



Figure 3. Deterioration in the ends of the beams

The sampling plan for the measurements of moisture content and wave velocity is presented in Figure 4. Subsequently, the subscripts R, T and L refer to the radial, tangential and longitudinal directions. The dimensions of the beams studied are detailed in Table 1.

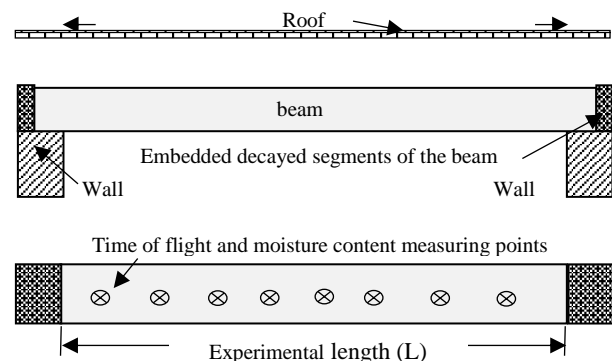


Figure 4. Sampling strategy for measurements of wave speed and moisture content

New beams				
No.	b (m)	h (m)	L (m)	I (m ⁴)
1	0.17	0.22	7.14	0.000151
2	0.18	0.22	7.05	0.000160
3	0.18	0.23	7.11	0.000183
4	0.17	0.22	7.18	0.000151
5	0.18	0.23	6.86	0.000183
\bar{x}	0.18	0.22	7.07	0.000165
σ	0.01	0.01	0.13	0.000016
CV	3.1	2.4	1.8	9.8
Old beams				
No.	b (m)	h (m)	L (m)	I (m ⁴)
1	0.16	0.24	6.78	0.000184
2	0.15	0.25	6.83	0.000195
3	0.17	0.24	6.84	0.000196

4	0.17	0.24	6.93	0.000196
5	0.15	0.23	6.92	0.000152
x	0.16	0.24	6.86	0.000185
σ	0.01	0.01	0.06	0.000019
CV	6.3	2.9	0.9	10.2

b = Base; h = High; L = Length; I = Modulus of inertia of the section; x = Mean; σ = Standard deviation; CV = Coefficient of variation.

Table 1. Geometrical properties of the beams

2.2 Density and humidity content. The apparent density of the wood was determined with the weight / volume ratio of 35 specimens with dimensions of 0.02 m x 0.02 m x 0.02 m (Raposo *et al.*, 2017), cut out of the ten beams under study. To lighten the text, subsequently, the "apparent density" of the wood will be written as "density". The moisture content of the wood was measured with an electric hygrometer (Dietsch *et al.*, 2015) at the same sites where the wave transmission times were measured (Figure 5).

2.3 Stress waves tests. The wave transmission times were measured with a Fakopp © device in transverse (seven measurements in h / 2) and longitudinal directions (two measurements in L / 3) of the beams (Figure 5).



Figure 5. Measurements of the humidity content and wave velocity.

The wave velocity was calculated with the distance / transmission time ratio (Dackermann *et al.*, 2014; Sasaki *et al.*, 2014). The averages of the measurements on a beam were considered for the analysis. The dynamic modulus of the beams was determined by adapting the protocols reported by Kloiber *et al.* (2016) as well as Morales and Machado (2017) and equation number (1) was used:

$$E = \rho_H \times v^2 \quad (1)$$

Where: E = Dynamic Modulus (N m⁻²)
 ρ_H = Density (kg m⁻³)
v = Wave velocity (m s⁻¹)

2.4 Experimental design. The two groups of five new beams and five old beams were considered two independent samples. The response variables of each sample were the moisture content (H), the density (ρ_H) and the wave velocity (v) in the radial-transverse (RT) and longitudinal (L) directions. The dynamic modulus (E) and the rigidity of the beams (EI) were considered as derived variables. Normality tests were carried out, as well as verification and analysis of variance. The demarcation criteria to accept a statistically significant difference for a confidence level of 95% were values of P ($\alpha = 0.05$) < 0.05.

3. RESULTS AND ANALYSIS

Table 2 presents the mean values, the standard deviations and the coefficients of variation of the measurements made in the new

beams and old beams. Table 3 shows the results of the statistical analysis proposed by the experimental design.

New beams						
No.	H (%)	ρ_H (kg m ⁻³)	v_{RT} (m s ⁻¹)	E_{RT} (MN m ⁻²)	v_L (m s ⁻¹)	E_L (MN m ⁻²)
1	11.1	706	1221	1052	5001	17653
2	10.9	541	1349	985	5296	15171
3	11.2	444	1430	909	4712	9869
4	10.6	556	1256	876	5057	14213
5	9.7	562	1627	1488	5256	15519
x	10.7	562	1377	1062	5064	14485
σ	0.60	94	162	248	234	2871
CV	5.6	16.6	11.8	23.3	4.6	19.8

Old Beams						
No.	H (%)	ρ_H (kg m ⁻³)	v_{RT} (m s ⁻¹)	E_{RT} (%)	v_L (kg m ⁻³)	E_L (m s ⁻¹)
1	9.2	487	1512	1113	4816	11301
2	9.0	505	1416	1012	5548	15533
3	10.1	476	1605	1226	4098	7988
4	9.1	479	1339	858	4698	10564
5	10.1	436	1703	1265	4199	7688
x	9.5	476	1515	1095	4672	10615
σ	0.55	25	145	165	579	3168
CV	5.8	5.3	9.6	15.1	12.4	29.8

H = Moisture content; ρ_H = Density; v = Ultrasound speed; E = Dynamic modulus; RT = Radial-tangential; L = Longitudinal; x = Mean; σ = Standard deviation; CV = Coefficient of variation (%).

Table 2. Measurement results

New beams		
Distribution tests	Skewness	Kurtosis
H	-1.387	1.016
ρ_H	0.626	0.971
v_{RT}	0.611	-0.465
E_{RT}	1.672	1.606
E_{IRT}	1.740	1.842
v_L	0.746	0.141
E_L	-1.048	1.022
E_{IL}	-0.421	-0.441
Old beams		
Distribution tests	Skewness	Kurtosis
H	0.488	-1.472
ρ_H	-1.002	1.022
v_{RT}	-1.102	1.194
E_{RT}	-0.559	-0.354
E_{IRT}	1.255	0.948
v_L	-0.731	0.105
E_L	0.911	0.353
E_{IL}	0.604	0.360

	Vervar	Anova
Hypothesis tests	$P_{(\alpha=0.05)}$	$P_{(\alpha=0.05)}$
H NB vs. H OB	0.946	0.011*
ρ_{CH} NB vs. ρ_{CH} OB	0.242	0.085
v_{RT} NB vs. v_{RT} OB	0.793	0.812
E_{RT} NB vs. E_{RT} OB	0.185	0.198
E_{IRT} NB vs. E_{IRT} OB	0.512	0.005*
v_L NB vs. v_L OB	0.175	0.759
E_L NB vs. E_L OB	0.174	0.759
E_{IL} NB vs. E_{IL} OB	0.491	0.316

H = Moisture content; ρ_H = Density; v = Ultrasound speed; E = Dynamic modulus; EI = Rigidity of beam; RT = Radial-tangential; L = Longitudinal; Vervar = Verification of variance; Anova = Analysis of variance; * Statistical difference at 95% of confidence.

Table 3. Statistical analysis results

3.1 Statistical analysis. For all the variables (H, ρ_H , v_{RT} , E_{RT} , v_L , E_L , E_{IRT} and E_{IL}) corresponding to the two samples studied (new beams and old beams) the values of skewness and kurtosis indicate that the distributions were statistically normal. Likewise, the verifications of the variance and its analysis allow us to conclude that there is no statistically significant difference between the magnitudes of the parameters studied in the two samples, except for the moisture content and the rigidity in the radial-tangential directions (Table 3).

3.2 Humidity content. The results of the statistical analysis indicate that there is a statistically significant difference between the moisture contents of the new and old beams. Arithmetically, the moisture content of the new beams was 1.6% higher than that of the old beams. The coefficients of variation of the two groups of beams were similar (Table 2).

The moisture content of the new beams was reached by drying treatment. In contrast, the moisture content of the old beams represents the equilibrium moisture content achieved during the service time of the structure in the interior ceiling. Once installed, the new beams will reach the moisture content in equilibrium for the wood exposed to the interior of a room in the Cathedral of Morelia.

According to Unterwieser and Schickhofer (2010), the impact of variation of moisture content on the density of new beams would be a factor of 0.67% decrease and on wave velocity a factor of 0.96% increase.

In this way, once the newly installed beams stabilize, the decrease in their density and the increase in the wave velocity will result in the increase of the dynamic modulus, which minimizes the risk of replacement of the beams. In short, the wood of the new beams is in a dry state and its moisture content is equivalent to that of the old beams. This corollary satisfies the recommendation to install structural elements of dry wood in restoration works (Riggio et al., 2018).

3.3 Density. The results of the statistical analysis indicate that there are no statistically significant differences between the wood densities of the new and old beams. The magnitudes of the densities are comparable with those reported for wooden beams of *Pinus* spp. endemic to the state of Michoacán (Sotomayor and Ramírez, 2013). The density of the new beams is 18.1% greater than the density of the old beams.

Even if we consider the decrease in density caused by the new equilibrium moisture content of the beams already installed, the density of the new beams ensures a magnitude equivalent to that of the old beams.

It is important to mention that the measurements of the density in the new and old beams were made with small specimens extracted from the central segments of the beams that did not contain visible deterioration. According to the hypothesis of the material homogeneity in the macroscopic scale of the wood, that is to say, with density distributed evenly throughout the volume of a piece under study, the differences between beams and between groups of new and old beams refers to the value average of the measurements without considering the variations in the anatomical structure of the wood.

Consequently, the density of the wood of the new beams, being greater than that of the old beams, satisfies the requirement of equivalent density in the reinstallation of old wooden beams in old buildings proposed by Cavalli et al. (2016b).

On the other hand, the coefficient of variation of the density of the new beams is 11.3% greater than the corresponding to that of the old beams. In effect, the coefficient of variation of the new beams differs from the coefficients of 8% reported for beams of *Pinus* spp. (Sotomayor et al., 2009) and 14% for beams of the same gender (Sotomayor and Ramírez, 2013).

Quite possibly, the group of new beams is formed by different species, a conjecture that goes against the principle of substitution of material recommended by the International Council on Monuments and Sites. This particularity derives from the need to identify the species of the new wood and trying to make it, at least, of the same kind as that of the old wood.

If substitution with wood of the same species cannot be ensured, then the density and rigidity of the beams are the criteria that can ensure a substitution of equivalent resistance characteristics.

3.4 Wave velocity. The results of the statistical analysis show that there are no significant differences between the wave velocities of the new and old beams for both the radial-tangential direction and the longitudinal direction. The wave velocities in the radial-tangential direction of the new beams were lower than the measurements in the old beams by 9% and their coefficient of variation increased 23%. The wave velocities in the longitudinal direction of the new beams were greater than those corresponding to the old beams by 8.4%, but their coefficient of variation decreased by 63%.

The results in the radial-tangential direction indicate that the measurements of the wave velocity in the cross sections of the beams are more sensitive to local variations in the structure and apparent quality of the wood. However, measurements in the longitudinal direction of the beams are more homogeneous compared to those in the radial-tangential direction.

The wave velocities in the longitudinal direction were greater with respect to those of the radial-tangential direction by a factor of 3.7 for the new beams and 3.1 for the old beams. These results are similar to the anisotropy radii measured in wood of different wood species reported by Dackermann et al. (2014).

The wave velocity is used as an indicator of the dynamic modulus in a given wood piece (Yamasaki et al., 2010). In such a way that, if the magnitudes of the wave velocities of the old wood do not differ considerably in comparison with another piece of freshly

sawn wood, both of the same species and with similar moisture contents, it can be proposed that their mechanical resistance is equivalent (Morales and Machado, 2017).

Figure 6 presents, in the form of maps, the variation of the wave velocities in the radial-tangential direction. The five beams studied are considered as a structural system. From the observation of these maps, it is deduced that there is no knot moving away from the layer indicating the existence of a material discontinuity caused by the deterioration of the wood.

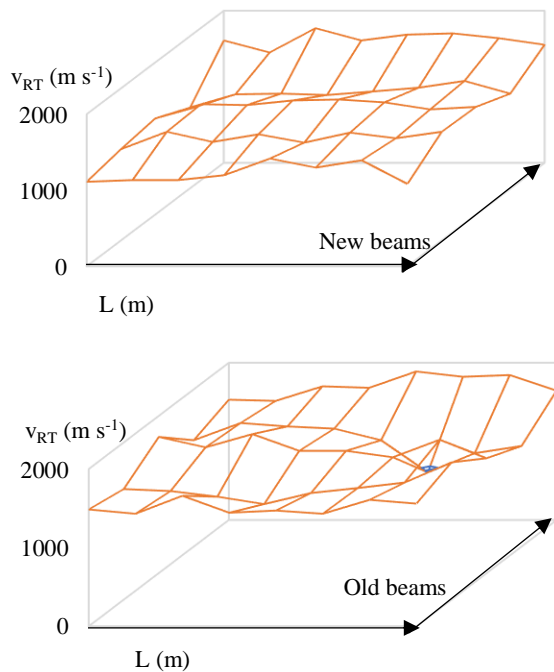


Figure 6. Map of the wave velocities measured in the radial-tangential direction of the beams.

The magnitudes of the wave speeds determined in this investigation (2019) are comparable with those reported in the literature for beams of the genus *Pinus* (Sotomayor et al., 2009). Thus, the results of this research suggest that, although there is a variability at the local level, as a whole the differences are not significant.

3.5 Dynamic modulus. The average value of the dynamic modulus in the radial-tangential direction of the new beams is 3% less than that corresponding to the average value of the old beams. The coefficient of variation of the new beams increases 51% with respect to that of the old beams. The dynamic moduli in the longitudinal direction of the new beams is 36% larger than those of the old beams. Likewise, the coefficient of variation of the new beams is 33.5% less than that of the old ones.

The dynamic modulus results from the calculation made with equation (1) where the density and the wave velocity are implicit. In this way, the variation of these parameters influences the magnitude of the dynamic modulus as a derived parameter (Yu et al., 2017). From here, it can be proposed that the density of the wood and the wave speed, measured directly on the beams, are descriptive indicators of the technological state of the wood. This argument is explained graphically in Figure 7 where, for the two types of beams of this investigation (2019), the dispersions of the velocities in the radial-tangential directions are represented and compared with the wave velocities for new *Pinus* beams spp.

reported by Sotomayor et al. (2009). From the point of view of the beam-by-beam comparison, the clouds intersect around the average values. However, particular values can be observed for each one of them.

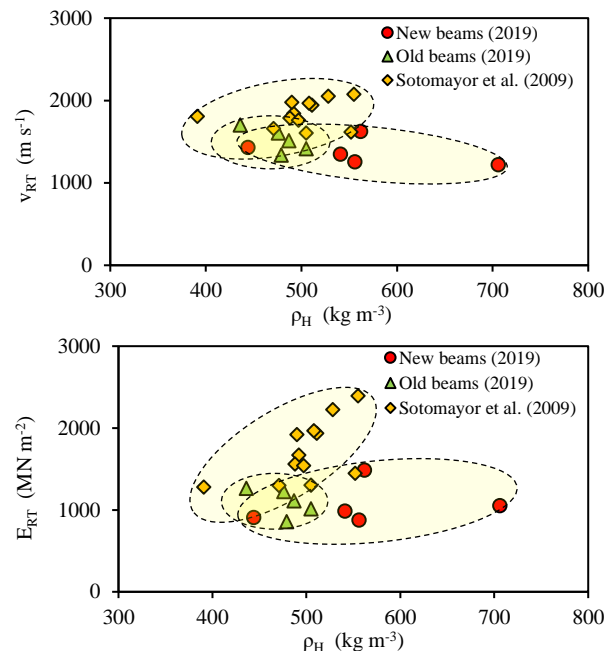


Figure 7. Dispersions of wave velocities and dynamic modulus in the radial-tangential direction

The density of the wood is considered as evenly distributed in the beam, and the wave velocity is idealized in a single and unique direction of the wood. However, the dynamic module represents an intensive parameter of the material that is representative and valid for a beam. This peculiarity in the methodology used in this case study suggests that, in as much as possible, a sufficient number of copies is necessary in order to ensure a statistically representative sample size.

3.6 Rigidity of the beams. To have a better perspective of the use of the dynamic module, it is advisable to introduce the concept of rigidity of the beam defined by the product of the dynamic modulus of the wood (E), weighted by the geometry properties of the beam, in this case, the moment of inertia I of its cross section.

Table 4 lists the stiffness values of the new and old beams, calculated with the results of Table 1 and 2.

No.	New beams	
	EI_{RT} ($MN\ m^2$)	EI_L ($MN\ m^2$)
1	0.159	2.663
2	0.157	2.423
3	0.166	1.801
4	0.132	2.144
5	0.271	2.832
\bar{x}	0.177	2.373
σ	0.054	0.411
CV	30.6	17.3

No.	Old beams	
	EI _{RT} (MN m ²)	EI _L (MN m ²)
1	0.279	2.083
2	0.277	3.034
3	0.314	1.564
4	0.262	2.069
5	0.259	1.169
\bar{x}	0.278	1.984
σ	0.022	0.700
CV	7.9	35.3

EI = Stiffness; RT = Radial-tangential; L = Longitudinal;
 \bar{x} = Mean; σ = Standard deviation; CV = Coefficient of variation (%).

Table 4. Stiffness of the beams

The stiffness calculated using the dynamic modulus in both the radial and tangential directions and the dimensions of the cross sections of the new beams is 36% less than that corresponding to the rigidity of the old beams; the coefficient of variation of the new beams increases 28.7% compared to that of the old beams.

The stiffness calculated using the dynamic module in the longitudinal direction and the dimensions of the cross sections of the new beams is 19.6% greater than that corresponding to the old beams. In addition, the coefficient of determination of the new beams decreases 51%.

Figure 8 contrasts stiffness (EI) values between both types of beams. By observing beam by beam, it is deduced that the stiffness (EIRT) of the new beams, calculated using the value corresponding to the radial-tangential dynamic modulus, is lower in comparison with those of the old beams. In contrast, the stiffness values (EIL) of the new beams, calculated using the longitudinal dynamic modules, become confused with those of the old ones.

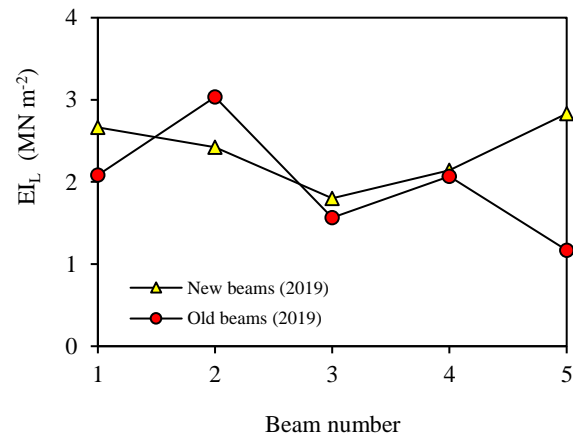
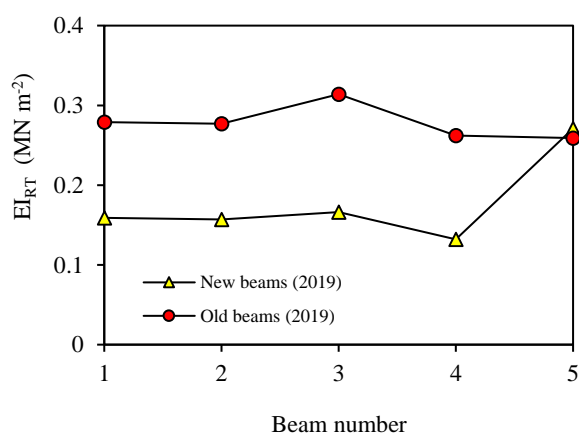


Figure 8. Stiffness dispersions

These results complement the criteria proposed in the bibliography (Munafò et al., 2015; Kránitz et al., 2016), which establish that the magnitudes of the elasticity modulus of the structural elements that replace old beams must be equivalent. However, they do not specify the analysis of EI stiffness, as a more specific parameter to ensure resistance, at least, equivalent to new beams in restoration work in buildings in service.

The EI stiffness of the beams is the combination of an intensive characteristic of the material, in this case, of the dynamic modulus of the wood and of the geometry of the structural element, in this case, of the transversal section corresponding to the radial and tangential directions. In effect, the average dimension of the base (b) of the new beams was greater than that corresponding to the old beams. In contrast, the average dimension of the height (h) of the new beams was lower than that corresponding to the old beams. These characteristics of the beams influenced the stiffness given that the height of the beams is the dimension that controls the magnitude of the moment of inertia. As a result, the moment of inertia of the new beams was 10.8% less than that of the old beams.

The international trend is to apply principles, standards and methodological proposals to ensure, after interventions, the safety and integrity of old wood structures (Kasal and Tannert, 2010, Koehl et al., 2013, Morales et al., 2014; Cruz et al., 2015, Feio and Machado, 2015, Tampone and Ruggieri, 2016, Ongaretto et al., 2016, Uzun et al., 2017, Clemente, 2018, Salonikios et al., 2018).

Considering that in Mexico restoration practices are not regulated, for practical purposes in this case study, possibly in the restoration work other criteria were considered for a better adaptation of the new roof beams.

4. CONCLUSIONS

The results of the structural analysis of wooden beams by non-destructive methods in restoration works of the Cathedral of Morelia, Mexico, suggest that the physical and mechanical characteristics of the new beams are equivalent to those of the old beams. Consequently, the strategy of replacing old and deteriorated beams with recently sawn beams was successful and satisfies the requirements of the International Council on Monuments and Sites with respect to the principles for the preservation of historic wooden structures.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was sponsored by the Doctoral Program in Wood Science and Technology, from the Faculty of Engineering in Wood Technology, from the Michoacán University of San Nicolás de Hidalgo, in Morelia, Michoacán, Mexico. We appreciate the support provided for this research by the National Institute of Anthropology and History (INAH), regional delegation of Michoacán and the authorities of the Metropolitan Cathedral of Morelia (Father Humberto González Correa Custodian of the Santa Mitra Building of the Metropolitan Cathedral of Morelia) and the department of Sacred Art, for the support and recommendations for this investigation.

REFERENCES

- Arangelovski, T., Gramatikov, K., and Docevska, M. 2015. Assessment of damaged timber structures using proof load test. Experience from case studies. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1271-1277.
- Aguilera, R. S., E. 2016. La Catedral de Morelia. Serie Cantera Rosa. Textos Archivísticos Colección V. H. Ayuntamiento de Morelia 2016, Dirección de Asuntos Interinstitucionales y Cabildo, Archivo Histórico Municipal de Morelia. 7-42 pp. 1-56.
- Barozzi, G., Cosentino, N., Lanzoni, L., and Tarantino, A. M. 2018. Safety assessment of historic timber structural elements. *Case Studies in Construction Materials*, 8, pp. 530-541.
- 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.
- Cavalli, A., Bevilacqua, L., Capocchi, G., Cibecchini, D., Fioravanti, M., Goli, G., Togni, M., and Uzielli, L. 2016a. MOE and MOR assessment of in service and dismantled old structural timber. *Engineering Structures*, 125, pp. 294-299.
- Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., and Sousa H. S. 2016b. A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. *Construction and Building Materials*, 114, pp. 681-687.
- Cestari, C. B., Cestari, L., Corradino, G., Crivellano, A., Marzi, T., and Panosch, P. 2010. Hidden architecture. Restoration of historic timber structures: the great roof structures of the Cathedral of Vercelli. Structural Faults & Repair 2010. 13th International Conference, Edinburgh, United Kingdom. pp. 1-12.
- Chen, Y., and Guo, W. 2017. Nondestructive Evaluation and Reliability Analysis for Determining the Mechanical Properties of Old Wood of Ancient Timber Structure. *BioResources*, 12(2), pp. 2310-2325.
- Clemente, P. 2018. Extending the life-span of cultural heritage structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(2), pp. 171-179.
- Croatto, G., and Turrini, U. 2014. Restoration of historical timber structures. Criteria, innovative solutions and case studies. In: *Seminário Intervir em construções existentes de madeira*. P. B. Lourenço, J. M. Branco e H. S. Sousa (eds.). Guimarães, Portugal. pp. 119-136.
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., and Lourenço, P. B. 2015. Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9, pp. 277-289.
- Dackermann, U., Crews, K., Kasal, B., Li, J., Riggio, M., Frank Rinn, F., and Tannert, T. 2014. In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. *Materials and Structures*, 47, pp. 787-803.
- Dahle, G., Carpenter, A., and DeVallance, D. 2016. Non-Destructive Measurement of the Modulus of Elasticity of Wood Using Acoustical Stress Waves. *Arboriculture & Urban Forestry*, 42(4), pp. 227-233.
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., and Winter, S. 2015. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2), pp. 115-127.
- Feio, A., and Machado, J. S. 2015. In-situ assessment of timber structural members: Combining information from visual strength grading and NDT/SDT methods. A review. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1157-1165.
- González, M. E. 2006. Estudio y proyecto para la Plaza Mayor de Morelia, Trazo, proporción y símbolo en el arte virreinal Morelia, UNAM Gobierno del Estado de Michoacán, pp. 375.
- Henriques, D. F., and Neves, A. S. 2015. Semi-destructive in situ tests as support to the assessment of a conservation process. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1253-1258.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). 1999. *Principles for the Preservation of Historic Timber Structures*, ICOMOS International Wood Committee, Mexico. 3 pp.
- 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.
- Kasal, B., and Tannert, T. 2010. *In Situ Assessment of Structural Timber*. State of the Art Report of the RILEM. Technical Committee 215-AST. Springer, Heidelberg, Germany.
- Kloiber, M., Drdácý, M., Machado, J. S., Piazza, M., and Yamaguchi, N. 2015. Prediction of mechanical properties by means of semi-destructive methods: A review. *Construction and Building Materials*, 101, pp. 1215-1234.
- 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.
- Koehl, M., Viale, A., and Reeb, S. 2013. A historical timber frame model for diagnosis and documentation before building restoration. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-2/W1, ISPRS 8th 3D GeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, Istanbul, Turkey. pp. 201-212.
- Kránitz, K., Deublein, M., and Niemz, P. 2014. Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices. *Materials and Structures*, 47, pp. 925-936.

- Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. T., and Niemz, P. 2016. Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science and Technology*, 50(1), pp. 7-22.
- Li, X., Dai, J., Qian, W., and Chang, L. 2015. Prediction of Internal Defect Area in Wooden Components by Stress Wave Velocity Analysis. *BioResources*, 10(3), pp. 4167-4177.
- Machado, J. S., Lourenço, P. B., and Palma, P. 2011. Assessment of the structural properties of timber members in situ. A probabilistic approach. SHATIS'11 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. Lisbon, Portugal. pp. 1-12.
- Munafò, P., Stazi, F., Tassi, C., and Davì, F. 2015. Experimentation on historic timber trusses to identify repair techniques compliant with the original structural–constructive conception. *Construction and Building Materials*, 87, pp. 54-66.
- Milch, J., Tippner, J., Sebera, V., Kunecký, J., Kloiberb, M., and Navrátila, M. 2016. The numerical assessment of a full-scale historical truss structure reconstructed with use of traditional all-wooden joints. *Journal of Cultural Heritage*, 21, pp. 759-766.
- Morales Conde, M. J., and Machado, J. S. 2017. Evaluation of cross-sectional variation of timber bending modulus of elasticity by stress waves. *Construction and Building Materials*, 134, pp. 617-625.
- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C., and Rubio de Hita, P. 2014. Use of ultrasound as a nondestructive evaluation technique for sustainable interventions on wooden structures. *Building and Environment*, 82, pp. 247-257.
- Ongaretto, E., Pozza, L., and Savoia, M. 2016. Wood-based solutions to improve quality and safety against seismic events in conservation of historical buildings. *International Journal for Quality Research*, 10(1), pp. 17-46.
- Raposo, P. C., Correia, J. A. F. O., Sousa, D., Salavessa, M. E. Reis, C., Oliveira, C., and De Jesus, A. 2017. Mechanical Properties of Wood Construction Materials from a Building from the 19th Century. *Procedia Structural Integrity*, 5, pp. 1097-1101.
- 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.
- Sasaki, Y., Yamasaki, M., Uchida, M., And Torichigai, T. 2014. Non-destructive Stress Evaluation of Wood Members in Japanese Traditional Building. 11th European Conference on Non-Destructive Testing, Prague, Czech Republic, pp. 1-8.
- Salonikios, T., Theodoulidis, N., Morfidis, K., Zacharopoulou, G., and Raptis, K. 2018. Efficiency investigation of structural interventions based on in situ ambient vibration measurements onAcheiropoietos Early Byzantine basilica, Thessaloniki, Greece. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(1), pp. 135-149.
- Sotomayor Castellanos J. R., and Ramírez Pérez, M. 2013. Velocidad de onda y módulos de elasticidad por ultrasonido y ondas de esfuerzo de vigas de madera de *Pinus* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(1), pp. 21-33.
- Sotomayor Castellanos, J. R., Bernabé Santiago, R., Hernández Maldonado, S. A., Sarmiento Bustos, D., Fernández García, G., and Alfaro Trujillo, I. 2009. Caracterización no destructiva de vigas de madera de *Pinus* spp. utilizando ultrasonido y ondas de esfuerzo. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 5(1), pp. 3-22.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., and Lourenço, P. B. 2016. A holistic methodology for probabilistic safety assessment of timber elements combining onsite and laboratory data. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(5), pp. 526-538.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., Machado, J. S., and Lourenço, P. B. 2017. Predicting mechanical properties of timber elements by regression analysis considering multicollinearity of non-destructive test results. SHATIS'17 International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. Istanbul, Turkey. pp. 1-9.
- Sousa, H. S., Machado, J. S., Branco, J. M., and Lourenço, P. B. 2015. Onsite assessment of structural timber by means of hierarchical models and probabilistic methods, *Construction and Building Materials*, 101(2), pp. 1188-1196.
- Tampone, G., and Ruggieri, N. 2016. State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure. *Journal of Cultural Heritage*, 22, pp. 1019-1027.
- Unterwieser, H., and Schickhofer, G. 2010. Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency and ultrasonic runtime measurement. *European Journal of Forest Products*, 69(2), pp. 171-181.
- Uzun, Z., Köse, C., and Köse, N. 2017. A multidisciplinary study to reveal the historical value of wooden structures and to develop a conservation approach: Dere and Karlı Mosques in Samsun, Turkey. *Journal of Cultural Heritage*, In Press.
- Walsh-Korb, Z., Avérous, L. 2018. Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. *Progress in Materials Science*, In press.
- Worthing, D., and Dann, N. 2000. Approaches to the repair of traditional timber-framed buildings: the application of conservation philosophy into practice. *Structural Survey*, 18(4), pp. 136-147.
- Yamasaki, M., Sasaki, Y. and Iijima, Y. J. 2010. Determining Young's modulus of timber on the basis of a strength database and stress wave propagation velocity II: effect of the reference distribution database on the determination. *Journal of Wood Science*, 56(5), pp. 380-386.
- Yu, Y., Liu, Y., Gong, M., Xu, Z., and Fang, Y. 2017. R&R study of using a stress wave timer to measure the elastic modulus of structural dimension lumber. *Measurement*, 95, pp. 293-296.
- Zhang, J., Xu, Q., Xu, Y., and Zhang, M. 2015. Research on residual bending capacities of used wood members based on the correlation between non-destructive testing results and the mechanical properties of wood. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16(7), pp. 541-550.

Study of the Degradation Effects on Aged Wood Beams from the Cathedral of Morelia, Mexico by Acoustic Birefringence Measurements

Mayra Carrillo^a and Hector Carreón^{b, *}

^aFacultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (UMSNH), Ciudad Universitaria, Morelia, México

^bInstituto de Investigaciones Metalúrgicas (UMSNH), Ciudad Universitaria, Morelia, México

*e-mail: hcarreon@umich.mx

Received July 9, 2020; revised September 29, 2020; accepted October 16, 2020

Abstract—The present study investigates the influence of degradation effects due to natural aging of wood beams from the Cathedral of Morelia, Mexico by using acoustic birefringence measurements. The acoustic anisotropy parameter for aged and un-aged Mexican pine (*Pinus strobus*) wood beams was calculated by the ultrasonic emission-transmission technique. The experimental measurements were carried out using a shear wave ultrasonic transducer with a central frequency of 0.5 MHz. Ultrasonic velocity data and scanning electron microscopy (SEM) were performed, establishing a direct correlation with the shear wave velocity and the acoustic anisotropy parameter developed on the naturally aged and un-aged wood. Therefore, the obtained experimental results not only contribute to the existing knowledge about aged wood but provide useful information about the possibilities of reusing wood as well.

Keywords: wood, shear wave, birefringence, acoustic anisotropy

DOI: 10.1134/S1061830921010034

1. INTRODUCTION

Among the buildings which integrate the artistic heritage of the city of Morelia, the Metropolitan Cathedral of Morelia stands out, located in the capital of the state of Michoacan, Mexico (1660–1744). It was designed by the Italian architect Vicencio Barroso de la Escayola, in a style typified by the experts as Baroque. It is dedicated to the Transfiguration of the Lord, the vice regal administration and the New Spanish ecclesiastical hierarchy considered it as the most ambitious project of the colonial territory for that century. In the ceiling framework of the capitular hall of the Cathedral of Morelia, the overall state of the wood beams was diagnosed as deplorable, for which a replacement was put underway for more recently sawed wood beams. The focus of this investigation was to determine the degree of degradation of the aged wood beams and compared with the recent wood beams by ultrasonic means. Consequently, the strategy of substituting old and deteriorated wood beams for recently sawed ones was successful and complies with the requirements of the International Council of Monuments and Sites as referred to in the principles for the preservation of historical wooden structures.

Due to ecological and environmental issues, quite often the general properties of a natural composite such as wood may experiment important change related to its structure. For example; wood aging is known as the inevitable modification (decay) of physical and mechanical properties of a material in the course of extensive storage or usage due to environmental influences [1, 2]. The most common degradation effects are wood destroying organisms, photo-degradation, weathering or long-term loading. During the wood decay process, an important quantity of mass, stiffness and strength loss is presented. As a result, monitoring wood decay process is needed to assure structural and safety requirements. Therefore, the characterization includes the material (wood) and structural features. Wood has an hierarchical structure from molecular to the macroscopic scale; tree (m), annual ring (cm), cells (mm), cell walls (μm), fibril (nm).

The main elements of wood are cellulose (50%), hemicellulose (35%), lignin (25%) and extractives. The cellulosic material has a basic component called cellulosic crystal. Wood has a basic crystal component. The hierarchical structure is mostly accountable for its high anisotropic elastic behavior. From the different scales of wood, it is possible to distinguish two cases for ultrasonic anisotropy namely; the *textural*

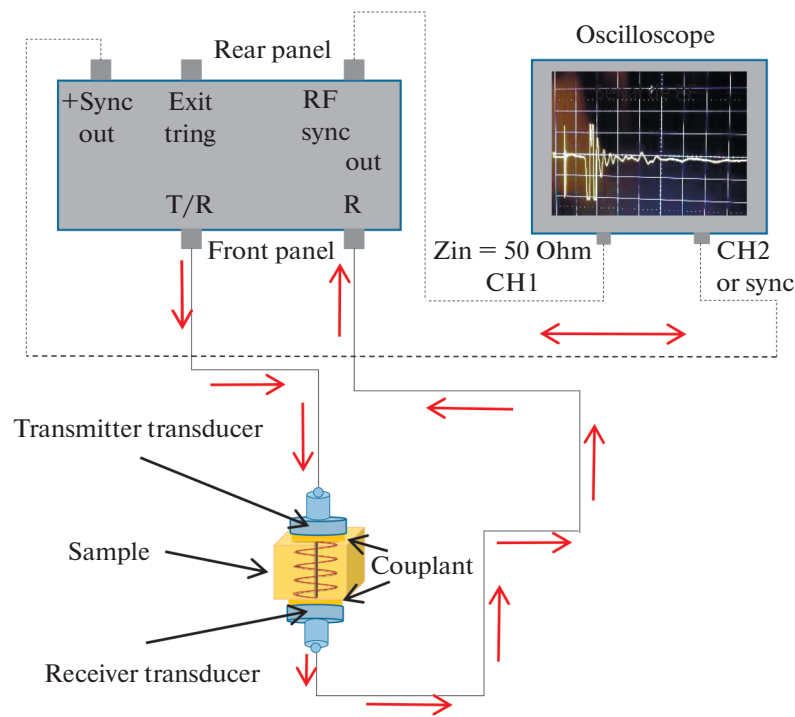


Fig. 1. Schematic diagram of the shear velocity measurements using the emission-transmission ultrasonic technique.

anisotropy at the scale of fibers induced by the preferential orientation of the anatomical elements (tracheids, fibers, ray cells, vessels etc.) and the *microstructural anisotropy* related to the cellular wall organization.

Anisotropy determination by nondestructive methods is a highly developed field using a great variety of different physical principles ranging from thermoelectricity to ultrasonic, electromagnetism, and ferromagnetism to assess the absolute level and relative distribution of texture in a material. Volkova et al. developed a method for acoustic assessment of the stress-strain state, the elastic moduli and the properties anisotropy of a pipeline material [3]. Carreon investigated the effect of thermoelectric anisotropy on the TEP measurements in a highly textured Ti-6Al-4V specimen, using a completely nondestructive technique based on the Seebeck effect [4].

On the other hand, the behavior of ultrasonic wave propagation in wood provides information on the internal structure of the material under investigation. The ultrasonic wave propagation velocity is related to the elastic constants, density of the medium and the internal structure wood parameters such as: annual ring structure, growth conditions, etc. [5, 6]. The purpose of this study is to investigate the effect of textural anisotropy on the polarization direction of the transversal wave by propagating ultrasonic shear wave in the principal wood directions (longitudinal, radial and tangential) with respect to the naturally aged and un-aged wood samples. So, we will apply the ultrasonic emission-transmission technique to calculate the degree of anisotropy due to the ultrasonic propagation shear velocity at the naturally aged and un-aged wood samples. In addition, microstructural examinations in the optical microscopy were carried out by relating anisotropy elastic properties to the observed wood microstructure [7].

2. ULTRASONIC EMISSION-TRANSMISSION TECHNIQUE

Ultrasonic transverse velocities were calculated by measuring the travel time for the ultrasonic waves through the naturally aged and un-aged wood samples. Figure 1 illustrates a schematic diagram of the ultrasonic measurements. A pair of shear-broadband transducers (V151-Panametrics) with a central frequency of 0.5 MHz and diameter element size of 25.4 mm was operated to induce transverse ultrasonic waves. In order to evade the non-uniform amplitude in the near field of transducer, a buffer rod (fused silica) was used to add a time delay between the excitation pulse and echoes returning from the measured sample [8, 9]. The ultrasonic transducer was seated on the wood specimen and excited by a Panametrics 55058PR high voltage pulser-receiver. The ultrasonic signal was digitized and averaged by a LeCroy Wave-surfur 432 oscilloscope and then sent to the computer for data processing. The ultrasonic device was used

to measure the travel time of the transmitted shear waves at a frequency of 500 kHz. The two transducers were located perpendicular to two opposite faces, thus implementing the direct measurement method, and were placed in pre-drilled bores to ensure good contact for optimal sound transmission. In addition, a small amount of echo shear wave couplant was placed between the face of each transducer and the test piece and then pressed into a thin layer. Travel times were recorded with an accuracy of 1 μ s as an average of ten measurements.

In experimental measurements, the beam diffraction usually generated considerable additions to the ultrasonic velocity parameter. In order to prevent the effect of diffraction on the echo waveforms, it was necessary to realize corrections to the two echo waveforms. First, a normalized distance, S , is calculated for each echo.

$$S = \frac{z\lambda}{a^2}, \quad (1)$$

where z is the propagation distance, a is the transducer radius and λ is the wavelength. The phase shift leads to a travel time diffraction correction as:

$$t = t' + \Delta t, \quad (2)$$

where t' is the measured travel time between echoes n and m (first and second), t is the corrected travel time and Δt is the travel time correction. The expression for the travel time correction is given by,

$$\Delta t = \frac{[\varphi(s_n) - \varphi(s_m)]}{2\pi f}, \quad (3)$$

where the phase φ is calculate at the normalized distance S for echoes n and m at the operating frequency. Finally, the ultrasonic transverse velocity is measured by $C_s = d/t$ where d is the sample thickness.

One of the promising ultrasonic techniques, based on the shear wave velocity changes, is a measurement of acoustic birefringence B . This parameter can be measured on composite material such as wood, with shear waves propagating in the thickness direction and polarized in two orthogonal directions which are acoustic axis of a material under investigation. Birefringence value is calculated from

$$B = \frac{(C_{12} - C_{13})}{(C_{12} + C_{13})/2} = \frac{(t_{12} - t_{13})}{(t_{12} + t_{13})/2}, \quad (4)$$

where C_{12} , C_{13} is the transverse velocities (m/s) propagating in the direction 1 and polarized in directions 2 and 3, respectively (m/s) and t_{12} , t_{13} are the times of flight of the shear wave propagating in direction 1 and polarized in directions 2 and 3, respectively.

3. EXPERIMENTAL PROCEDURE

3.1. Material

Shear wave birefringence measurements at 500 kHz were performed using the emission-transmission technique on cubic wood samples. In this study, we worked with pine samples extracted from different wood beams in service which it was in used in a historic building “the Metropolitan Cathedral of Morelia” (aged wood) and with a healthy wood sample, Pinus (the new beams were acquired in sawmills from the state of Michoacán, Mexico), which did not suffer physical deformations caused by mechanical stress or biological attacks (recent wood). For the two types of wood samples, the areas suitable for the ultrasound inspection were selected resulting in 30 mm cubes. Subsequently, its identification, classification and orientation were carried out for each of the wood samples. Taking into account that ultrasound measurements would be carried out in the three main directions of the wood (Longitudinal, Radial and Tangential) as shown in Fig. 2. The samples of healthy wood were found in optimal conditions. On the other hand, the wood samples obtained from the beam in service show a deterioration of its internal properties in relation to the healthy wood. The moisture content $MC = 12\%$ of the recent and aged wood samples were measured with a FMW Moisture Detector, based on a capacitive method. The wood samples were conditioned in a dry chamber at 43% relative humidity and 20°C for three months to achieve and equilibrium moisture content.

3.2. Scanning Electron Microscopy

The samples for the Scanning Electron Microscope were cut with the following dimensions; 8 mm \times 8 mm \times 8 mm. As the sample is non-conductive organic, the samples must first be carefully cleaned,

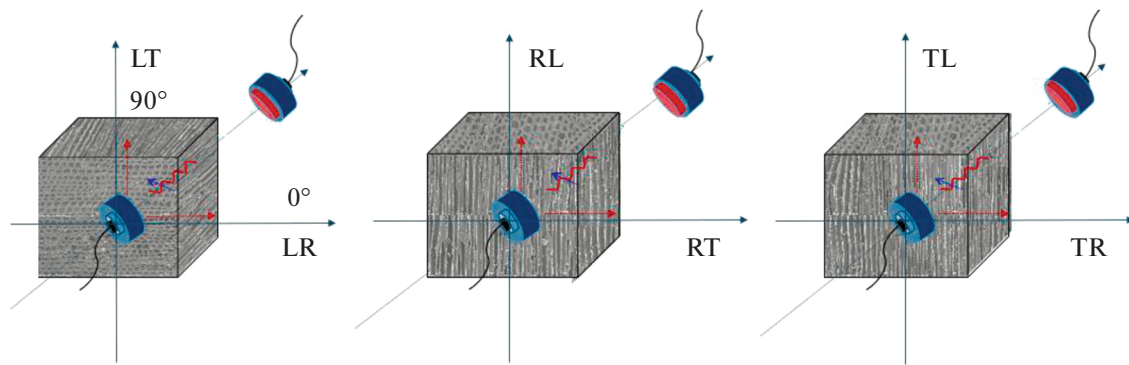


Fig. 2. Selected coordinate reference for the wood cube samples. Note that the first letter indicates the main direction of the wood cube sample; longitudinal (L), radial (R) and tangential (T) while the second letter indicates the ultrasonic wave polarization direction.

which must be dry and electrically conductive. For this reason, they were coated with a layer of metallic conductive material by means of the Sputtering technique (sputtering). The sections were mounted on carbon discs applied to stubs in order to scan with a JEOL JSPM-5200 field-emission scanning electron microscope. The following settings were utilized to view the cross-section of the wood samples in the SEI (secondary electron imaging) mode: working distance 11 mm, accelerating voltage 15 kV, emission 10 μ A, probe current 7.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Scanning Electron Microscopy Results

From the SEM analysis, we can observe that in the cross section of healthy wood it is possible to show the longitudinal tracheids with a very marked circular section and its internal structure is free of deformations by load and the lumen opening light is clean. In the case of deteriorated wood, tracheids no longer have this circular shape, the general conditions of cell walls in deteriorated wood sample showing deformations due to crushing, fissures and tears as it is shown in Fig. 3 (top). The lumens of the healthy wood sample are presented in their radial cut at 200 μ m. The difference between the deteriorated wood group and the healthy wood group is the ruptures and tears from load deformation and the lumen opening light is notable as it is shown in Fig. 4 (middle). Finally, in the healthy wood in its tangential cut at 200 μ m, the images of this group show the difference between them. Healthy wood is free from deformation by load; the lumen opening light is clean. In deteriorated wood presents deformations by load on the cell wall, the lumen opening light is blocked by both nymphs and dust residues as it is shown in Fig. 3 (bottom).

4.2. Analysis of Ultrasound Data

The ultrasonic measurements realized by means of the contact technique (emission-transmission inspection), using a two pairs of shear wave transducers (V151/0.5MHz/1.0"), were realized to analyze the behavior of the ultrasonic transverse wave with respect to the different wood samples of recent wood and aged wood as shown their cross section by SEM. Measurements were taken at the main directions of the wood cube samples namely longitudinal, radial, and tangential directions. The velocities measured were C_{LT} , C_{LR} , C_{RL} , C_{RT} , C_{TL} and C_{TR} were calculated by carefully aligning the shear transducer such that the polarization was in the desired direction (90 deg) as it is shown in Fig. 2. The shear wave velocities values for recent and aged wood samples are presented in Fig. 4. The measured data are shown as a histogram of the probability distributions for the longitudinal direction (LT and LR), radial direction (RL and RT) and tangential direction (TL and TR). Comparing mean values of the histograms for the recent to aged wood samples showed an ability to detect internal structure local changes in the longitudinal, radial and tangential directions.

We clearly see that the longitudinal direction exhibits a weak shear wave birefringence and the strongest birefringence is showed by the tangential direction for which the C_{TL} and C_{TR} are separated significantly. This can be explained because the stress waves induced in the longitudinal direction (top) have higher velocity because they travel along the vertically oriented cells and encounter few to no boundaries to

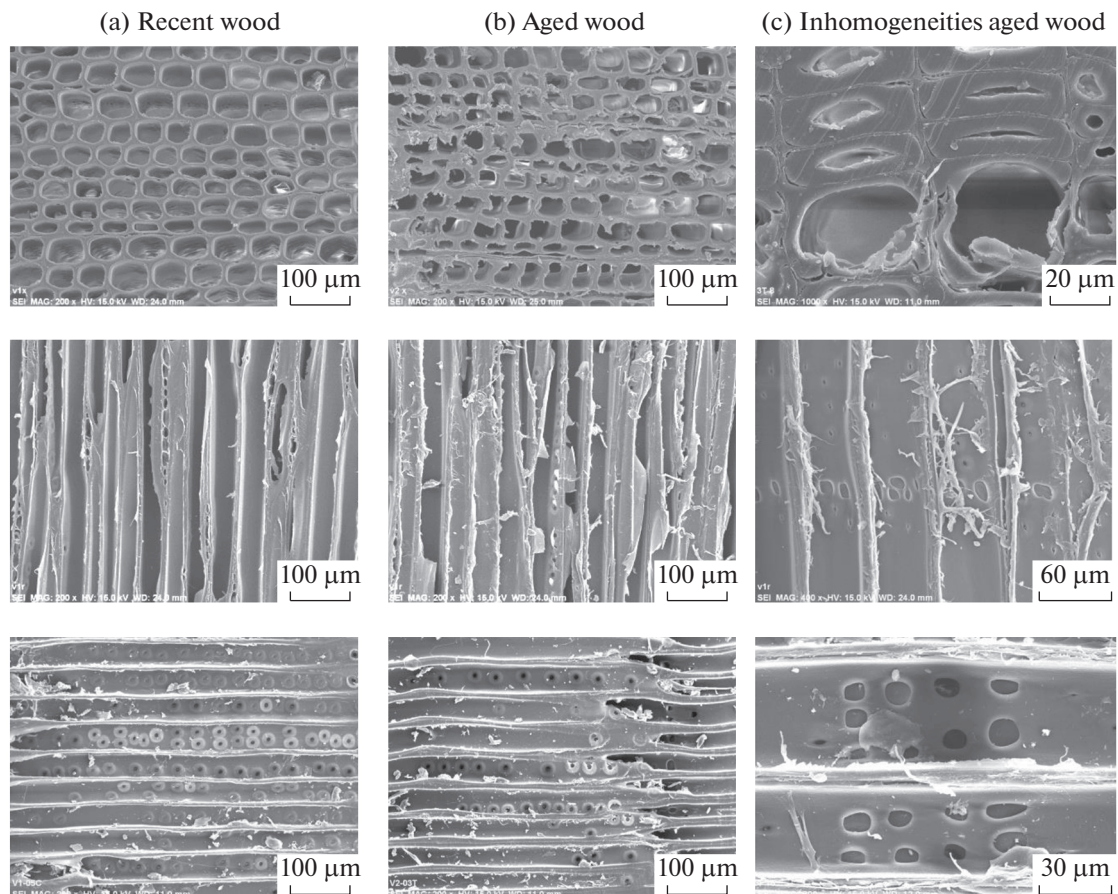


Fig. 3. SEM of a cross section of the Longitudinal (top) Radial (middle) and Tangential (bottom) main directions of the wood cube sample for (a) recent wood and (b) aged wood and (c) magnification of inhomogeneities at aged wood taken in the secondary electron imaging mode.

impede their progression as shown in Fig. 3. On the other hand, in the tangential (bottom) and radial (middle) directions the transverse waves encounter numerous boundaries and interfaces at the anatomical elements such as tracheids, fibers, ray cells, vessels which reduce their shear velocity as shown in Fig. 3.

Transverse waves travel over a localized portion of a member; their velocities are local parameters and are used to evaluate only local properties and conditions at the testing site. Waveform distortion is mainly caused by the multilayered nature of the wooden samples which leads to guided wave effects at higher frequencies (earlywood and latewood) properties are very different from each other. It was observed that ultrasonic velocity is higher in recent wood comparing to aged wood samples and changes depending on the orientation of the principal wood axes. For example, for the recent wood sample the fastest mode through the tangential direction at shear wave polarization birefringence TR was found to be approximately 1100 m/s at 0.5 MHz, while for the aged wood samples, the velocities measured in the tangential direction at shear wave polarization birefringence TR were 900 m/s at the for same frequency respectively.

On the other hand, for the recent wood sample the fastest mode through the longitudinal direction at shear wave polarization birefringence LR was found to be approximately 1800 m/s at 0.5 Mhz, while for the aged wood samples, the velocities measured in the longitudinal direction at shear wave polarization birefringence LR were only 1600 m/s at the for same frequency respectively [10]. The elastic anisotropy of wood is due its texture induced by the characteristic structural organization, which is highly ordered in the longitudinal direction by cellular disposition and in the radial and tangential directions by the presence of annual rings. In addition, the elastic anisotropy is also affected by the presence of compliant features (e.g. cracks, micro fractures, grain joints) which are presented in the aged wood samples as it shown in Fig. 3c. In addition, the degree of anisotropy by ultrasonic measurements increased by as much as 5% in the longitudinal direction, 7% in the radial and 15% in the tangential direction relative to shear wave birefringence at the two different wood conditions recent and aged respectively see Fig. 5.

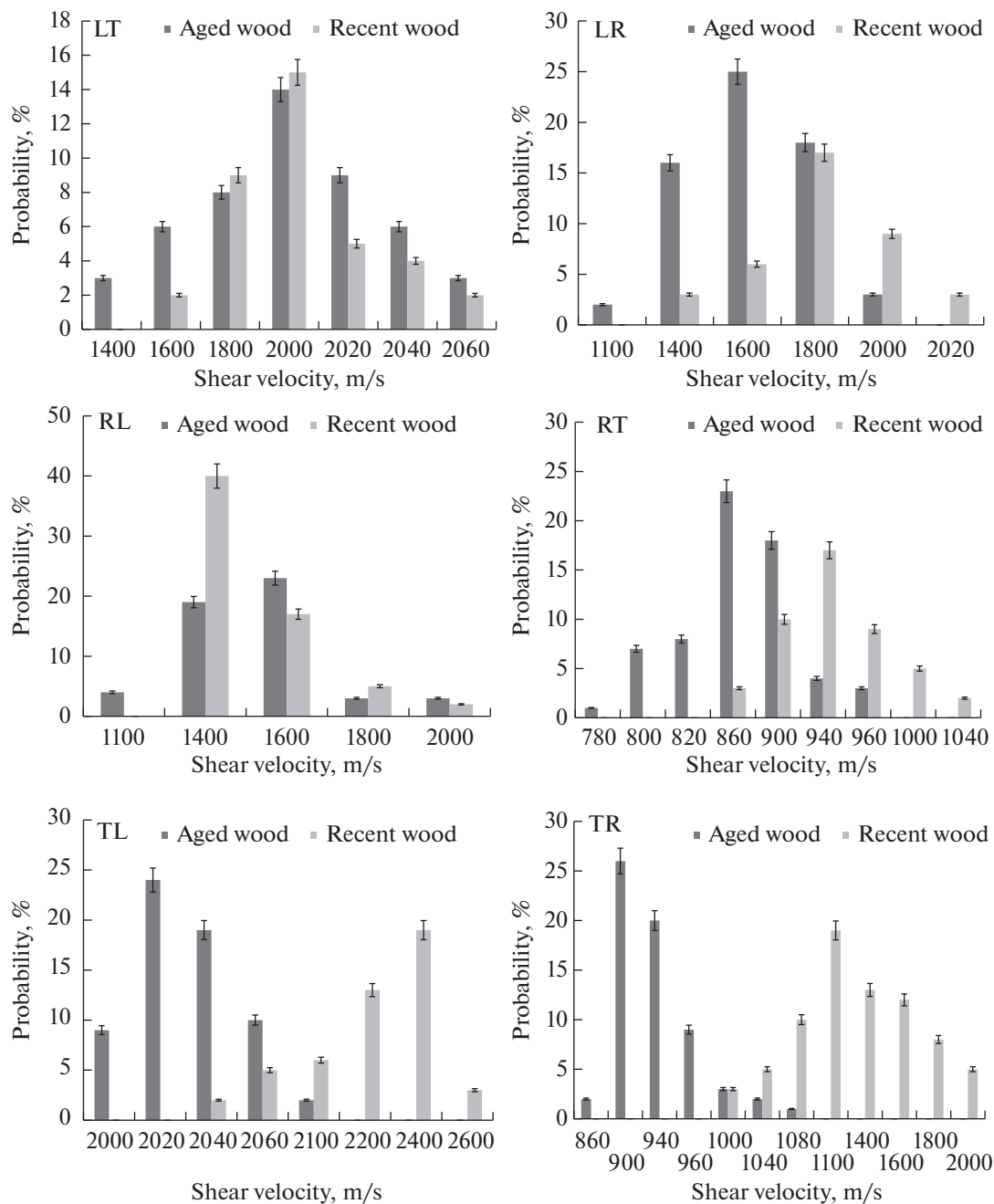


Fig. 4. Histogram of the probability distributions for the longitudinal direction (LT and LR), radial direction (RL and RT) and tangential direction (TL and TR) for recent and aged wood samples.

The ultrasonic results can be affected by the deviation of the energy flux because the thickness of the specimen increases the influence of the grain and ring orientations on the wave propagation. This behaviour is well explained by Kohlhauser and Hellmich [11] who showed that the ultrasound measurements in non-principal directions are very sensitive to errors, yielding errors in the non-diagonal components (off-diagonal stiffness) and affecting the calculation of the elastic properties. In this paper we used a constant thickness of 30 mm in all wood samples. Twenty-five ultrasonic measurements were taken at the main directions of the wood cube samples from different degrees of aging. Each 25 ultrasonic measurements were carried out on 20 different samples; 10 recent and 10 aged wood samples respectively, and these measurements were then averaged to get a representative value of the anisotropy coefficient. It was also observed a waveform distortion mainly caused by the multilayered nature of the wooden specimens

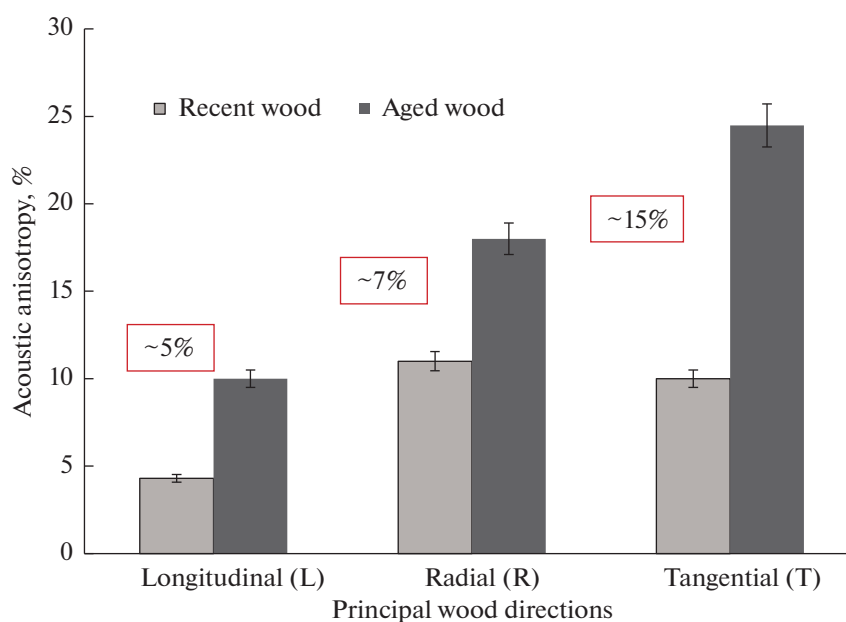


Fig. 5. Degree of anisotropy by ultrasonic measurements for recent and aged wood samples.

which leads to ultrasonic wave effects at radial and tangential directions (recent-wood and aged-wood properties are very different from each other), For example; minor changes in the cell wall structure due to aging may have an effect on the velocity of ultrasound and could also affect the elastic wood properties.

5. CONCLUSIONS

The change in the ultrasonic shear wave velocity depends on the textural anisotropy and structural direction of the wood. The shear wave birefringence phenomena has successfully determined the degree of elastic anisotropy caused by texture due to the preferential orientation of the anatomical elements (tracheids, fibers, ray cells, vessels) in recent and aged wood samples. The measurements revealed higher values of acoustic anisotropy for aged comparing to recent wood in the longitudinal, radial and tangential directions. It is supposed that the difference is more likely a consequence of the wood age rather than a consequence of variability in densities and the structure parameters (annual ring structure, microfibril angle, growth conditions). These data can be correlated with the deterioration condition of the wood based on the velocity at which ultrasonic transverse waves propagate through them. Using the velocity of ultrasonic waves propagating through wood-composite material can be used to evaluate or predict the internal condition state, especially during an accelerated aging process. In addition, the ultrasonic method can be applied to other species of wood and engineered wood.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was performed at UMSNH-MEXICO with partially funding from CONACYT-MEXICO under project CB-2015/256013 and CIC-UMSNH. We also appreciate the support provided for this research by the National Institute of Anthropology and History (INAH), regional delegation of Michoacan and the authorities of the Metropolitan Cathedral of Morelia and the department of Sacred Art.

REFERENCES

1. Riggio, M., D'Ayala, D., Parisi, M.A., and Tardini, C., Assessment of heritage timber structures: review of standards, guidelines and procedures, *J. Cult. Heritage*, 2018, vol. 31, pp. 220–235.
2. Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., and Sousa, H.S., A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber, *Constr. Build. Mater.*, 2016, vol. 114, pp. 681–687.
3. Volkova, L.V., Murav'eva, O.V., Murav'ev, and V.V., Buldakova, I.V., Device and methods for measuring of acoustic anisotropy and the residual stress in the main gas pipelines' metal, *Devices & Methods Meas.*, vol. 10, no. 1, pp. 42–52.

4. Carreon, H., Thermoelectric nondestructive texture characterization in Ti–6Al–4V. *NDT&E Int.*, 2006, vol. 39, no. 6, pp. 433–440.
5. Rede, V., Essert, S., and Šokčević, Z., Effects of microstructural orientation on the abrasive wear resistance of subfossil elm wood in three orthogonal planes, *Wear*, 2017, vol. 380, pp. 1–5.
6. Lahr, F.A.R., Christoforo, A.L., Panzera, T.H., Silva, D.A.L., and Goncalves, D., Anisotropy influence in obtaining stiffness property bending of Brazilian wood species, *Int. J. Mater. Eng.*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 92–96.
7. Sonderegger, W., Kránitz, K., Bues, C., and Niemz, P., Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood, *J. Cult. Heritage*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 883–889.
8. Carrillo, M. and Carreón, H., Ultrasonic determination of the elastic and shear modulus on aged wood, *Non-destructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIII*, Gyekenyesi, A. L., Ed., Denver: SPIE, 2019, vol. 109711Z, pp. 1–5.
9. Carreon, H., Carreon-Garcidueñas, M., Carreon, M.L., and Almanza, V., Determination of the elastic properties at aging of medical Ti–6Al–4V ELI alloy by ultrasonic velocity measurements, *Phys. Mesomech.*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 32–38.
10. Yasutoshi S., and Masumi H., Effect of anisotropy on acoustoelastic birefringence in wood, *Ultrasonics*, 2007, vol. 46, no. 2, pp. 84–190.
11. Kohlhauser, C., and Hellmich, C., 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, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 2012, vol. 33, pp. 82–98.