



Universidad Michoacana de San



Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera

División de Estudios de Posgrado

**Evaluación por Métodos no Destructivos de Madera de Pino como
Fundamento para Uso Estructural en Edificios Históricos**

Tesis

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Presenta:

Arq. Mayra Iriery Carrillo Gómez

Asesor:

Dr. José Cruz de León

Coasesor:

Dr. Héctor Guillermo Carreón Garcidueñas

Sinodales:

Dr. Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Dr. Gildardo Cruz de León

Morelia, Michoacán, febrero 2018

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

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

A mis maestros quienes nunca desistieron al enseñarme.

A los sinodales quienes estudiaron mi tesis y la aprobaron.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

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 Conacyt, ya que por su apoyo económico como becaria dentro de su programa de maestrías y dentro del proyecto CB 2015/256013 pude obtener hoy mi grado como Maestra en Ciencias y Tecnología de la Madera.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitir la creación de un instituto en el cual impartir postgrados.

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

Al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas por las facilidades brindadas para la realización de mi trabajo de investigación.

A mi director de tesis el Dr. José Cruz de León, quien me apoyo a lo largo de toda mi maestría y en mi investigación.

A mi coasesor del Dr. Héctor Guillermo Carreón Garcidueñas, quien me brindó su apoyo a lo largo de toda mi maestría sacando lo mejor de mí para ser una mejor persona.

A mi mesa sinodal al Dr. Javier Ramón Sotomayor Castellanos, al Dr. Raúl Espinoza Herrera y al Dr. Gildardo Cruz de León, ya que gracias a sus aportaciones se enriqueció mi trabajo de investigación.

ÍNDICE

Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
Índice de figuras.....	8
Índice de figuras de Antecedentes	8
Índice de figuras del Estado del Arte.....	10
Índice de figuras de Materiales.....	12
Índice de figuras de Metodología.....	14
Índice de figuras de Resultados.....	15
Índice de figuras de Discusión.....	23
Índice de Ecuaciones.....	24
Resumen.....	25
Abstract.....	26
1 Introducción.....	27
2 Antecedentes	31
2.1 Panorama actual del empleo de la madera en las edificaciones.....	31
2.1.1. El proceso de inspección de las estructuras de madera de una edificación en un centro urbano, en el caso de España consiste en:.....	33
2.2. La utilización de Técnicas de Ultrasonido en la conservación de las estructuras históricas.....	35
2.3. Utilización de Técnicas de Ultrasonido en la madera.....	37
2.4. Origen del material.....	49
2.4.1. Descripción del inmueble.....	51
3 Estado del Arte.....	53
3.1 La Madera de pinos.....	53
3.2 Características Anatómicas de la madera.....	55
3.2.1 Tejido Parenquimático Tejido Vascular Tejido Fibroso.....	56
3.2.2. Estructura Macroscópica	57
3.3. Definición de Planos o Secciones	61
3.4 Propiedades Físicas de la Madera.....	63
3.4.1 Material Anisotrópico.....	63
3.4.2. Materiales ortotrópicos	64
3.4.3. Higroscopicidad	65
3.4.4. Contenido de Humedad.....	65
3.4.5. Densidad	65

3.4.6. Dureza.....	66
3.4.7. Propiedades Térmicas	66
3.4.8. Propiedades Acústicas.....	67
3.4.9. Transmisión del sonido.....	67
3.5 Los Defectos Naturales en la Madera Aserrada.....	68
3.5.1. Médula incluida.	68
3.5.2. Bandas anchas de parénquima.....	68
3.5.3. Grano, hilo o fibra.....	69
3.5.4. Nudos.....	70
3.5.5. Bolsas de resina.....	72
3.6. Degradación de la madera.....	72
3.6.1. Patologías de la madera.....	73
3.7 Propiedades Mecánicas de la Madera.....	74
3.7.1. Resistencia a la flexión.....	75
3.7.2. Resistencia a la tracción.....	75
3.7.3. Resistencia a la compresión.....	76
3.7.4. Módulo de Young o Módulo de elasticidad longitudinal.....	77
3.7.5. Módulo de Corte.....	78
3. 8. Vigas.....	79
3.9. Planteamiento general de la clasificación visual.....	81
3.9.1. La inspección y diagnóstico de estructuras de madera.....	81
3.10. Tratamientos preventivos y curativos para eliminar las plagas de la madera.....	81
3.11 Los Inicios de la detección de ondas de alta frecuencia acústica.....	82
3.12. Ultrasonido.....	83
3.12.1. Ondas Ultrasónicas.....	84
3.12.2. Tipos de ondas en sólidos y fluidos.....	86
3.13. Velocidad ultrasónica.....	87
3.13.1. Velocidad Ultrasónica y Microestructura.....	88
3.14. Atenuación Ultrasónica.....	89
3.15. Técnicas Ultrasónicas de Inspección.....	90
3.15.1. Técnica Ultrasónica de contacto.....	90
3.15.2. Método Eco Pulso.....	91
3.15.3. Método de transmisión.....	91
3.15.4. Método de resonancia.....	92
3.16. Microscopia Electrónica de Barrido.....	92

3.16.1. Preparación De Muestras	94
4 Justificación.....	97
5 Hipótesis	98
6 Objetivos	98
6.1 Objetivo General	98
6.1.1 Objetivos específicos	98
7 Materiales.....	99
7.1 Condiciones de las vigas, previas a la obtención de las muestras.....	99
7.2 Características de las secciones de las vigas	101
7.2.1 Viga 1	101
7.2.2. Viga 2	106
7.3. Criterio de muestreo de las secciones de vigas	112
7.4. Material de muestras empleado para las imágenes microscópicas de la madera sana y deteriorada	113
7.5 Descripción anatómica de la madera de <i>pinus. muestra Viga 1</i>	115
7.5.1 Características organolépticas	115
7.5.2 Descripción macroscópica y microscópica	115
7.6 Descripción anatómica de la madera de <i>Pinus strobus variedad chiapensis Viga 2</i>	117
7.6.1 Características organolépticas	117
7.6.2 Descripción macroscópica y microscópica	118
8 Metodología	121
8. 1. Equipo de Ultrasonido para la técnica de contacto	127
8.1.1 Pulsador/receptor Modelo Panametrics.....	128
8.1. 2 Osciloscopio HP digital.....	128
8.1.3 Transductor	129
8.1.4 Adquisición de señales Ultrasónicas	129
8.1.5 Velocidad ultrasónica	130
8.1.6 Atenuación ultrasónica	130
8.1.7. Descripción microscópica de la madera	131
8.1.7.1. Determinación de abundancia y tamaño de los elementos estructurales	135
9. Resultados	137
9.1 Descripción de la metodología del análisis estadístico de los resultados de las mediciones	137
9. 1. 1 Velocidad de onda Longitudinal.	139
9.1.2 Velocidad de onda Transversal	148
9.2 Velocidad Longitudinal para los sentidos LL, RR y TT.	167
9.2.1 Módulo de Young para los sentidos LL, RR, y TT.	169

9.2.2 Atenuación Ultrasónica para los sentidos LL, RR, y TT.	171
9.3. Velocidad de onda Transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.	173
9.3.1 Módulo de Corte para la Onda transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.	175
9.3.2 Atenuación Ultrasónica para la Onda transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.	178
9.4. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal.	180
9.4.1. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Madera Sana.	181
9.4.2. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Viga 1.	182
9.4.3. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Viga 2.	184
9.4.4. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Madera Sana.	185
9.4.5. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Viga 1.	187
9.4.6. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Viga 1.	188
9.4.7. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Madera Sana.	190
9.4.8. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Viga 1.	192
9.4.9. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Viga 2.	194
9.5 Relación de la Atenuación Ultrasónica entre la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal y el Número de Anillos.	196
9. 6 Anatomía de las muestras de madera sana, viga y viga 2.	197
9.6.1 Imágenes Microscópicas de las muestras de la Madera Sana, de la madera de la Viga 1 y la madera de la Viga 2.	197
9.6.2. Determinación de los elementos estructurales de las muestras a nivel microscópico.	203
9.6.3. Determinación de abundancia y tamaño de los elementos estructurales de las muestras a nivel microscópico.	204
10 Discusión.	211
11 Conclusiones.	218
12 Recomendaciones.	222
Bibliografía.	223

Índice de figuras

Índice de figuras de Antecedentes

Figura 2. 1 Tabla de resultados del artículo (Sotomayor Castellanos, 2015, pp. 34-42) donde se muestran las densidades, la velocidad de onda de esfuerzo, el módulo de elasticidad, la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación resultantes de su investigación.....	38
Figura 2. 2 Tabla 1 del artículo Anisotropía del Módulo de Elasticidad y de Resistencia en Compresión de la Madera de Pinus Douglasiana y pinus pringlei, Sotomayor (2015), donde se muestran la densidad básica, el contenido de humedad, el módulo de elasticidad en compresión, la resistencia de compresión, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.	40
Figura 2. 3 Tabla de resultados obtenidos para especies chilenas, donde se observan el valor medio, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la Velocidad de Propagación, el módulo de Elasticidad, la dirección longitudinal, la dirección radial y la dirección tangencial. (Baradit, 2013)	41
Figura 2. 4 Tabla de resultados obtenidos para las 5 vigas antiguas de Picea abies, donde se observan el valor del contenido de humedad, la Densidad, el módulo de Elasticidad y de ruptura, (Sotomayor, 2014).....	42
Figura 2. 5 Tabla de Funciones modificación para la resistencia y la rigidez. Los valores para las funciones modificación para la resistencia $\alpha(Ex(\cdot))$ y para las funciones modificación para la rigidez $\delta(Ex(\cdot))$, para riesgos de la estructura a las acciones s , ω y T durante el intervalo $[0,t]$, para diferentes contenidos de humedad de la madera (ω), (Sotomayor, 2017)	44
Figura 2. 6 Dispositivos para pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo, (A y B), dispositivo para pruebas de vibraciones transversales, (C y D) (Sotomayor Castellanos, 2017).	45
Figura 2. 7 Dispersión de los datos experimentales para cada especie y según las diferentes pruebas realizadas, (Sotomayor Castellanos, 2017)	46
Figura 2. 8 (A) A Sistema de coordenadas de referencia asignado para los cubos de madera y la terminología utilizada en este estudio; (B) Bloque de madera sana (izquierda) vs. bloque de madera expuesto a diez semanas de descomposición controlada (derecha)” (McGvern, 2011)	47
Figura 2. 9 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 (2011)	47
Figura 2. 10 Coeficientes para los diversos ajustes polinomiales para las velocidades correspondientes, en función de la frecuencia y el porcentaje de pérdida de masa para las nueve direcciones medidas diferentes. (Mc Govern, 2011)	48
Figura 2. 11 Coeficientes para los diversos ajustes polinomiales para las atenuaciones correspondientes, en función de la frecuencia y el porcentaje de pérdida de masa para las nueve direcciones medidas diferentes. (Mc Govern, 2011)	48
Figura 2. 12 (A) Vista del patio del Museo (B) Vista exterior del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.	49
Figura 2. 13 (A). Vista del pasillo del Museo, (B) Vista interior del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos. ...	49
Figura 2. 14 (A) Carretas de madera que forman parte de la exhibición del Museo, (B) Vista de la vigería exterior del primer piso del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.	50
Figura 2. 15 (A) Vista de una de las salas de exhibición del Museo, (B) Vista de una de las puertas del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.	50
Figura 2. 16 . (A) Vista del área de servicio del Museo, (B) Vista de la escalera del Museo y Archivo Histórico ...	51

Figura 2. 17 (A) Vista interior del área de consulta del Museo, (B) Vista interior del área de consulta y de resguardo del y Archivo Histórico Casa de Morelos..... 51

Índice de figuras del Estado del Arte

Figura 3. 1. Ejemplos de las características de las coníferas (Biodiversidad.gob.mx, 2017).	54
Figura 3. 2 Capas que conforman las paredes celulares en la madera (Agriculture, 2010).	56
Figura 3. 3 Estructuras celulares de madera de coníferas, (Esteban, 1988).	57
Figura 3. 4 Secciones o planos de la madera (Maderas, 2014)	58
Figura 3. 5 Características de principales de un tronco (Maderas, 2014)	58
Figura 3. 6 Anillos de crecimiento (forestales, 2010)	59
Figura 3. 7 Tipos de puntuaciones: (A) Puntuaciones ; A primarias, B aeroleadas: (a) laminilla media, (b) pared primaria, (c) pared secundaria, (d) campo de puntuaciones c/ plasmodesmos, (e) apertura de la puntuación, (f) membrana puntuación, (g) plasmodesmos, (h) torus, (i) imago, (j) apertura C puntuación cerrada; D escalariforme; E opuestas; F alterna, G puntuaciones simples: c/ apertura en forma de ranura; G puntuaciones areoladas con ranura; H tipo de puntuaciones en campo de cruzamiento en coníferas, (Justo José Barañaño, 2008). (B) Tabla donde se muestran características de algunas especies argentinas del periodo Jurásico como puntuaciones, engrosamiento de pared celular, campos de cruzamiento y radios leñosos (Herbst, 2017). (C) Tipos de puntuaciones, campos de cruzamiento y rayos leñosos de especies argentinas del periodo Jurásico (Gnaedinger, 2017).	60
Figura 3. 8 Canal resinífero y elementos que conforman el tejido en coníferas (Justo José Barañaño, 2008)	61
Figura 3. 9 Estructura microscópica de coníferas. (madera, 2011)	62
Figura 3. 10 Fotografía de un conjunto de células de Madera (Hoadley, 2000)	63
Figura 3. 11 El eje longitudinal (1), eje radial (2) y el eje tangencial (3) (Agriculture, 2010)	64
Figura 3. 12 Dirección o eje longitudinal (1), dirección o eje radial (2) y dirección o eje tangencial (3) (Javiersv, 2013)	64
Figura 3. 14 Ejemplos de obtención de densidad (Garcia, 2012)	66
Figura 3. 15 Esquema de ensayo de dureza (puede medirse en forma normal o paralela a la fibra) (Salas, 2013)	66
Figura 3. 16 Combustión de Madera (pxhere, 2017)	66
Figura 3. 17 Soporte para iPad RH Gramófono: Amplificador de madera de roble pasivo (Hardware, 2012)	67
Figura 3. 18 Ilustración de ejemplo de Médula Inclínada (Agriculture, 2010)	68
Figura 3. 19 Fotografía donde se muestran las bandas anchas de parénquima (Echenique Manrique R., 1993)	69
Figura 3. 20 Desviación del Grano (A) y (B) en un Plano, (C) en dos Planos (Agriculture, 2010)	69
Figura 3. 21 Medición de la Inclínación del Grano (Agriculture, 2010)	70
Figura 3. 22 Esquema de los Principales Tipos de Nudos en la Madera;(A) Nudo fijo, (B) y (C) Nudo flojo, (D) Nudo en forma de perno, (E) Nudo en forma de perno mostrando la porción fija y la floja (Agriculture, 2010)	71
Figura 3. 23 Nudos arracimados. (Agriculture, 2010)	71
Figura 3. 24 Nudos arracimados o en racimo (Agriculture, 2010)	72
Figura 3. 25 Bolsa de resina (Agriculture, 2010)	72
Figura 3. 26 (A)Relación tensión – deformación de una conifera libre de defectos a flexión.(Giuliano, 2009), (B) Diagrama de resistencia a la flexión en madera. (Salas, 2013)	75
Figura 3. 27 (A) Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos a tracción y compresión. (Giuliano, 2009), (B) Diagrama ensayo de tracción paralelo a las fibras, (C) ensayo de tracción normal a las fibras, (D) ensayo de tracción normal radial a las fibras. (Salas, 2013)	76
Figura 5. 28 (A) Relación tensión-deformación a compresión perpendicular. (Giuliano, 2009), (B) Esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras, (C) esquema de ensayo de compresión normal a las fibras. (Salas, 2013)	76

Figura 3. 29 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).....	77
Figura 3. 30 (A) Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos atracción y compresión. (Giuliano, 2009), (B) Esquema de las fibras de la madera en sus ejes principales.....	78
Figura 3. 31 (A) cubo someterlo a una fuerza cortante, (B) diagrama del esfuerzo cortante. (Ambrose, 1998).....	78
Figura 3. 32 (A) Tensión tangencial de cortadura, (B) Tensión tangencial de deslizamiento Y (C) Tensiones tangenciales de rodadura. (construcciones, 2016).....	79
Figura 3. 33 Entramado de vigas transversales y longitudinales en un puente de vigas.	79
Figura 3. 34 Forma de trabajo de un puente con vigas.	80
Figura 3. 35 Distribución de esfuerzos por flexión. (Duque, 2004).....	80
Figura 3. 36 Distribución de esfuerzos internos según la composición de una viga. (Duque, 2004).....	80
Figura 3. 37 Forma de propagación de la onda longitudinal.....	85
Figura 3. 38 Forma de propagación de las Ondas Transversales.....	85
Figura 3. 39 Patrón de vibración producido por una Onda Superficial propagándose en una superficie libre en un medio sólido.	85
Figura 3. 40 Unidades, Simbología y Constantes Elásticas de las Ondas Ultrasónicas.	87
Figura 3. 41 Tren de Ecos recibidos por la pared posterior del espécimen.....	88
Figura 3. 42 Técnica Ultrasónica de contacto.	91
Figura 3. 43 Diagramas del Método de eco pulso.	91
Figura 3. 44 Método de Trasmisión.....	92
Figura 3. 45 Método de Resonancia.	92
Figura 3. 46 Microscopio electrónico de barrido.....	93

Índice de figuras de Materiales.

Figura 7. 1(A) Vista interior de la vigería del Museo, (B) Vista del segundo patio interior y (C) Vista interior del estado actual la vigería y Archivo Histórico Casa de Morelos.	99
Figura 7. 2 Vigas actuales de madera de pino nacional, (A y B) Secciones de vigas, de madera de pino nacional.	99
Figura 7. 3 (A) se muestran las vigas 1 y 2 (B) al momento de ser seccionadas y (C) las secciones resultantes de estos coretes.....	100
Figura 7. 4 (A) y (B) se muestran las vigas de madera sana	100
Figura 7. 5 Se muestran las secciones de vigas 1 y 2 apiladas para ser secadas.....	100
Figura 7. 6 (A) Representación de la Cara A, de las secciones de las vigas. (B) Representación de la Cara B, de las secciones de las vigas.....	101
Figura 7. 7 (A) lado L A, (B) lado L B, (C) cara C A, (D) vista superior, (E) vista inferior, (F) cara C B de la sección V1-01.....	101
Figura 7. 8 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-01	102
Figura 7. 9 (A) Sección 2 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) cara C B, (D) lado L B de la sección V1-02.....	102
Figura 7. 10 Cara B de la sección V1-02.....	103
Figura 7. 11 (A) Sección 3 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-03.....	103
Figura 7. 12 Cara B de la sección V1-03.....	104
Figura 7. 13 (A) Sección 4 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-04.....	104
Figura 7. 14 Cara B de la sección V1-03.....	105
Figura 7. 15 (A) Sección 5 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-05.....	105
Figura 7. 16 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-05	106
Figura 7. 17 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-01.....	106
Figura 7. 18 Cara B de la sección V2-01.....	107
Figura 7. 19 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02.....	107
Figura 7. 20 Cara B de la sección V2-02.....	108
Figura 7. 21 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02.....	108
Figura 7. 22 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-05	109
Figura 7. 23 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-04.....	109
Figura 7. 24 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V2-04	110
Figura 7. 25 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-05.....	110
Figura 7. 26 Cara B de la sección V2-05.....	111
Figura 7. 27 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02.....	111
Figura 7. 28 Cara B de la sección V2-06.....	111
Figura 7. 29 Diagrama de momentos, donde vemos las fuerzas verticales y esfuerzos de flexión. Se pueden observar las zonas comprimidas y las zonas traccionadas.....	112
Figura 7. 30 Prueba de flexión estática tradicional.....	112
Figura 7. 31 (A) LA y LB (representación de los puntos donde fueron tomadas las muestras para cada uno de los lados A y B. Para cada sección de las vigas). (B) Representación de los puntos donde fueron tomadas las muestras para cada uno de los lados Superior e Inferior.	113
Figura 7. 32 Cortes de las caras viga 1 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico	113

Figura 7. 33 Cortes de las caras viga 1 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico	114
Figura 7. 34 Cortes de las caras viga 2 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico	114
Figura 7. 35 Cortes de las caras viga 2 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico	114
Figura 7. 36 Cortes de la madera sana para muestras con un espesor de 10 cm. (A) secciones de madera sana, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico.....	114
Figura 7. 37 Sección de la viga donde se obtuvo el material de estudio, mostrando coloración de albura y duramen	115
Figura 7. 38 Anillo de crecimiento visto a 40X con canal resinífero y parénquima leñoso (Izquierda), corte transversal visto a 100X mostrando contorno de las traqueidas y canales resiníferos (Derecha).....	116
Figura 7. 39 Puntuaciones de areoladas en doble hilera vistas a 400X (Izquierda) y traqueidas en material disociado vistas a 200X (Derecha).....	116
Figura 7. 40 Cortes tangenciales vistos a 100X y 400X, mostrando radios uniseriados de altura variable y radio fusiforme	117
Figura 7. 41 Corte radial mostrando el ataque de los hongos en la madera (Izquierda), sección transversal con parénquima leñoso alrededor del canal resinífero (Derecha).....	117
Figura 7. 42 Sección de la viga donde se obtuvo el material de estudio, mostrando la coloración de albura y duramen	118
Figura 7. 43 Cortes transversales a vistos a 40X y 100X, mostrando transición, contorno de las traqueidas y canales resiníferos	119
Figura 7. 44 Traqueidas con puntuaciones areoladas en 1 y 2 hileras vistas a 400X	119
Figura 7. 45 Cortes tangenciales vistos a 100X y 400X, mostrando radios uniseriados y radios fusiformes	120
Figura 7. 46 Corte radial mostrando hifas en parénquima radial y traqueidas axiales (Izquierda), parénquima leñoso cercano al canal resinífero.....	120

Índice de figuras de Metodología.

Figura 8. 1 Probetas de madera deteriorada empleadas	121
Figura 8. 2 Probetas de madera sana empleadas.....	122
Figura 8. 3 Diagrama de Flujo de la metodología experimental	123
Figura 8. 4 Diagrama de Flujo de la metodología experimental	124
Figura 8. 5 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera.....	125
Figura 8. 6 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera.....	126
Figura 8. 7 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las ondas longitudinales y transversales.....	126
Figura 8. 8 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera.....	127
Figura 8. 9 Esquema de Equipo de medición de Ultrasonido.....	128
Figura 8. 10 Pulsar/Receiver Modelo Panametrics	128
Figura 8. 11 Osciloscopio HP digital.....	128
Figura 8. 12 (A) Transductores de onda longitudinal V103 frecuencia 1.0Mhz y (B)transductores de onda transversal: V151 frecuencia 0.5Mhz	129
Figura 8. 13 (A)Transformación de un pulso en el dominio del tiempo (B) al dominio de la frecuencia	129
Figura 8. 14 Montura de aleación de Aluminio y muestras.....	131
Figura 8. 15 (A) Micrótopo para corte de muestras, (B) muestras para corte.....	132
Figura 8. 16 (A) Muestras viga 1, (B) muestras viga 2, (C) muestras madera sana	132
Figura 8. 17 Muestras viga 1 a 4x y 10x (A) corte tangencial, (B) corte transversal, (C) corte radial, (D) corte tangencial.....	133
Figura 8. 18 Muestras viga 2 a 4x y 10x (A) corte radial, (B) corte transversal, (C) corte tangencial, (D) corte tangencial donde se aprecian los hongos existentes en la madera	133
Figura 8. 19 Muestras sanas a 4x y 10x (A) corte tangencial, (B) corte transversal, (C) corte radial, (D) corte tangencial.....	133
Figura 8. 20 (A) Muestras viga 1, (B) muestras viga 2, (C) muestras madera sana	133
Figura 8. 21 (A) ácidos empleados, (B) mezcla de ácidos, (C) colocación de la mezcla en las muestras	134
Figura 8. 22 (A) Cocción y expedición de gases, (B) agitación del material, (C) obtención de material disociado de las Muestras.....	134
Figura 8. 23 (A) obtención de material disociado de las muestras, (B) material disociado con el tinte colocado en el cubreobjetos.....	135
Figura 8. 24 Imágenes microscópicas de las muestras de madera sana y deterioradas	136

Índice de figuras de Resultados.

Figura 9. 1 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.....	139
Figura 9. 2 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.	140
Figura 9. 3 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal.....	140
Figura 9. 4 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.....	140
Figura 9. 5 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	141
Figura 9. 6 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young.....	141
Figura 9. 7 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.....	141
Figura 9. 8 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	142
Figura 9. 9 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación.....	142
Figura 9. 10 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial.....	142
Figura 9. 11 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	143
Figura 9. 12 Resultados de la relación entre el sentido RR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal.....	143
Figura 9. 13 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial ...	143
Figura 9. 14 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	144
Figura 9. 15 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young.....	144
Figura 9. 16 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial.....	144
Figura 9. 17 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	145
Figura 9. 18 Resultados de la relación entre el sentido RR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación.....	145
Figura 9. 19 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial.....	145
Figura 9. 20 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.....	146
Figura 9. 21 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal.....	146
Figura 9. 22 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial.....	146

Figura 9. 23 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	147
Figura 9. 24 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young	147
Figura 9. 25 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial.....	147
Figura 9. 26 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	148
Figura 9. 27 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación.....	148
Figura 9. 28 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial	149
Figura 9. 29 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	149
Figura 9. 30 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal.....	149
Figura 9. 31 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial	150
Figura 9. 32 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	150
Figura 9. 33 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte	150
Figura 9. 34 Resultados de la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial	151
Figura 9. 35 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	151
Figura 9. 36 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	151
Figura 9. 37 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal transversal.....	152
Figura 9. 38 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	152
Figura 9. 39 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación.....	152
Figura 9. 40 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal tangencial.....	153
Figura 9. 41 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	153
Figura 9. 42 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	153
Figura 9. 43 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal tangencial.....	154
Figura 9. 44 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	154
Figura 9. 45 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	154

Figura 9. 46 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal.....	155
Figura 9. 47 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	155
Figura 9. 48 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación.....	155
Figura 9. 49 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal.....	156
Figura 9. 50 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	156
Figura 9. 51 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	156
Figura 9. 52 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal.....	157
Figura 9. 53 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	157
Figura 9. 54 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	157
Figura 9. 55 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial radial.....	158
Figura 9. 56 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	158
Figura 9. 57 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal	158
Figura 9. 58 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial transversal.....	159
Figura 9. 59 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	159
Figura 9. 60 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte	159
Figura 9. 61 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial tangencial.....	160
Figura 9. 62 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	160
Figura 9. 63 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	160
Figura 9. 64 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal.....	161
Figura 9. 65 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	161
Figura 9. 66 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal.....	161
Figura 9. 67 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal.....	162
Figura 9. 68 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	162

Figura 9. 69 Resultados de la relación entre el sentido TL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte	162
Figura 9. 70 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal.....	163
Figura 9. 71 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	163
Figura 9. 72 Resultados de la relación entre el sentido TL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	163
Figura 9. 73 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial.....	164
Figura 9. 74 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	164
Figura 9. 75 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal.....	164
Figura 9. 76 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial.	165
Figura 9. 77 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2	165
Figura 9. 78 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte	165
Figura 9. 79 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial.....	166
Figura 9. 80 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.....	166
Figura 9. 81 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación	166
Figura 9. 82 Resultados para la velocidad longitudinal, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal, radial y tangencial	167
Figura 9. 83 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial).	167
Figura 9. 84 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial).....	168
Figura 9. 85 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)	168
Figura 9. 86 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial).....	168
Figura 9. 87 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial).	168
Figura 9. 88 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial).....	169
Figura 9. 89 Resultados para el módulo de Young (sentido longitudinal, radial y tangencial).....	169
Figura 9. 90 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial.....	170
Figura 9. 91 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial.	170

Figura 9. 92 . Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial	170
Figura 9. 93 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial.....	170
Figura 9. 94 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial	170
Figura 9. 95 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial.....	171
Figura 9. 96 Resultados para la atenuación, para las maderas en el sentido longitudinal, radial y tangencial	171
Figura 9. 97 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial.....	172
Figura 9. 98 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial	172
Figura 9. 99 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencia).....	172
Figura 9. 100 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial).....	172
Figura 9. 101 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial).....	172
Figura 9. 102 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial).....	173
Figura 9. 103 Resultados para la velocidad transversal, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR).....	173
Figura 9. 104 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera sana	174
Figura 9. 105 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la velocidad transversal.....	174
Figura 9. 106 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera de la viga 1	174
Figura 9. 107 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para la velocidad transversal.....	174
Figura 9. 108 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera de la viga 2.....	175
Figura 9. 109 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 para la velocidad transversal	175
Figura 9. 110 Resultados para el módulo de Corte, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR)	176
Figura 9. 111 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos en las muestras de madera sana.....	176
Figura 9. 112 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para el módulo de corte	176
Figura 9. 113 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos de las muestras de la viga 1	177
Figura 9. 114 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para el módulo de corte	177

Figura 9. 115 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos de las muestras de la viga 2	177
Figura 9. 116 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 el módulo de corte	177
Figura 9. 117 Resultados para la atenuación ultrasónica, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR)	178
Figura 9. 118 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los sentidos de las muestras de madera sana	178
Figura 9. 119 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la Atenuación ...	179
Figura 9. 120 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los sentidos de las muestras de madera sana	179
Figura 9. 121 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 la Atenuación .	179
Figura 9. 122 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de madera de la viga 2	179
Figura 9. 123 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 en la Atenuación	180
Figura 9. 124 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	181
Figura 9. 125 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	181
Figura 9. 126 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera sana entre los nueve sentidos	182
Figura 9. 127 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	182
Figura 9. 128 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1	183
Figura 9. 129 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1	183
Figura 9. 130 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal y la velocidad transversal, para las muestras de la viga 1 entre los nueve sentidos	183
Figura 9. 131 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1	183
Figura 9. 132 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2	184
Figura 9. 133 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 2	184
Figura 9. 134 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para las velocidades longitudinal y transversal, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos.....	185
Figura 9. 135 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera en la viga 2	185
Figura 9. 136 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	185
Figura 9. 137 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	186
Figura 9. 138 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias de la madera sana para el módulo de Young y el módulo de Corte	186
Figura 9. 139 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana para el módulo de Young y el de Corte	186
Figura 9. 140 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1 para el módulo de Young y el módulo de Corte	187
Figura 9. 141 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1 para el módulo de Young y el módulo de Corte	187

Figura 9. 142 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young y el de Corte, para las muestras de la madera de la viga 1 entre los nueve sentidos	188
Figura 9. 143 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1	188
Figura 9. 144 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2	188
Figura 9. 145 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 2	189
Figura 9. 146 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias entre el módulo de Young y el de corte, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos	189
Figura 9. 147 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2	189
Figura 9. 148 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	190
Figura 9. 149 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana	190
Figura 9. 150 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera sana entre los nueve sentidos	191
Figura 9. 151 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1	191
Figura 9. 152 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1	192
Figura 9. 153 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1	192
Figura 9. 154 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera de la viga 1 entre los nueve sentidos.....	193
Figura 9. 155 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1	193
Figura 9. 156 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2	194
Figura 9. 157 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1	194
Figura 9. 158 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos.....	195
Figura 9. 159 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 8.8 Graficas de las mediciones efectuadas con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal para cada tipo de madera en cada uno de los sentidos	195
Figura 9. 160 Resultados de los promedios para la Atenuación con la velocidad longitudinal y la velocidad transversal y el número de anillos, en los tres tipos de muestras	196
Figura 9. 161 (A) Muestra de madera sana corte transversal a 2000 μm	198
Figura 9. 162 (B, C, D y E) Muestra de madera sana corte transversal a 100 μm	198
Figura 9. 163 (A) Muestra de la madera de la viga 1 corte transversal a 2000 μm	199
Figura 9. 164 (B, C, D y E) Muestra de la viga 1 parte superior sometida a tensión corte transversal a 100 μm .	199
Figura 9. 165 (A) Muestra de la viga 1 área superior corte transversal a 2000 μm	200
Figura 9. 166 (B, C, D y E) Muestra viga 1 parte inferior área sometida a tensión, corte transversal a 100 μm ..	200
Figura 9. 167 (A) Muestra de la viga 2 área inferior corte transversal a 2000 μm	201
Figura 9. 168 (B, C, D y E) Muestra de la viga 2 área inferior sometida a tensión corte transversal a 100 μm ...	201
Figura 9. 169 (A) Muestra de la viga 2 área superior corte transversal a 2000 μm	202
Figura 9. 170 (B, C, D y E) Muestra viga 2 área sometida a compresión, corte transversal a 100 μm	202
Figura 9. 171 Muestra de madera sana en corte transversal a 100 μm . b) corte de madera sana vista radial, a 100 μm . c) vista del campo de cruzamiento de la madera sana a 30 μm	203
Figura 9. 172 Muestra de viga 1 parte sometida a tensión corte transversal a 100 μm . b) corte radial de madera de la viga 1 vista con dos tipos de puntuaciones a 100 μm . c) corte tangencial de la viga 2 a 100 μm	204

Figura 9. 173 Muestra viga 2 parte sometida a tensión corte transversal a 100µm. b) corte radial de madera de la viga 2 vista con puntuaciones uniseriadas a 100µm. c) corte tangencial de la viga 2 donde se ven los rayos a 100 µm.....	204
Figura 9. 174 Muestra viga 2 parte sometida a tensión corte transversal donde se observa el campo de cruzamiento a 100 µm. b) corte radial de madera de la viga 1 vista de la pared de traqueida fracturada, residuos de madera y una linfa de hogos a 30µm. c) corte transversal	204
Figura 9. 175 Elementos en el material disociado.....	205
Figura 9. 176 Elementos en el material disociado en la muestra de 8x8x8 mm.....	206
Figura 9. 177 Longitud de traqueidas en la muestra de 8x8x8 mm.....	206
Figura 9. 178 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V 130	207
Figura 9. 179 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V130, en las muestras	207
Figura 9. 180 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V 151	208
Figura 9. 181 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V151, en las muestras	208
Figura 9. 182 Coeficiente de rigidez en los tres materiales	209
Figura 9. 183 Coeficiente de flexibilidad en los tres materiales.....	209
Figura 9. 184 Coeficiente de Peteri en los tres materiales	210
Figura 9. 185 Relación de Runkel en los tres materiales	210

Índice de figuras de Discusión.

Figura 10. 1 Grafica de los promedios de la Velocidad Longitudinal, de las tres caras de las muestras en sus tres sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2.....	211
Figura 10. 2 Grafica de los promedios de la Velocidad Transversal, de las tres caras de las muestras en sus seis sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2.....	212
Figura 10. 3 Grafica de los promedios del Módulo de Young empleando la Velocidad Longitudinal, en las tres caras en sus tres sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga 2	213
Figura 10. 4 Grafica de los promedios del Módulo de Corte empleando la Velocidad Transversal, en las tres caras en sus seis sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga2.....	214
Figura 10. 5 Grafica de los promedios de la Atenuación Ultrasónica empleando la Velocidad Longitudinal, en las tres caras en sus tres sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga 2	215
Figura 10. 6 Grafica de los promedios de la Atenuación Ultrasónica empleando la Velocidad Transversal, en las tres caras de las muestras en sus seis sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2	215

Índice de Ecuaciones.

Ecuación 1. Contenido de Humedad.....	65
Ecuación 5. Dimensiones del Módulo de Young.....	77
Ecuación 6. Módulo de Young.....	77
Ecuación 7. Módulo de Corte S o Tensión cortante.....	78
Ecuación 8. Esfuerzo por unidad de área.....	78
Ecuación 9. Relación de Deformación angular.....	79
Ecuación 10. Onda acústica.....	86
Ecuación 11. Velocidad de fase.....	86
Ecuación 12. Velocidad de las ondas longitudinales.....	86
Ecuación 13. Velocidad de las ondas transversales.....	86
Ecuación 14. Velocidad de propagación en el material.....	88
Ecuación 15. Relación de amplitudes.....	89
Ecuación 16. Pérdida total de la atenuación.....	89
Ecuación 17. Coeficiente de atenuación.....	90
Ecuación 18. Relación de amplitudes.....	92
Ecuación 19. Valores de rigidez diagonales.....	130
Ecuación 20. Aproximación el módulo de Young a los valores de rigidez.....	130
Ecuación 21. Módulo de Corte.....	130
Ecuación 22. Coeficiente de atenuación.....	131
Ecuación 23. Coeficiente o índice de rigidez.....	136
Ecuación 24. Coeficiente de flexibilidad.....	136
Ecuación 25. Coeficiente de Peteri o índices de esbeltez.....	136
Ecuación 26. Relación Runkel.....	136
Ecuación 27 Umbral de detección de la técnica ultrasónica de emisión transmisión.....	197

Resumen

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

Morelia fundada en el siglo XVI posee 1,113 edificios, 260 relevantes históricamente, 390 hectáreas, 219 manzanas y 15 plazas; en 1991 ingresa a la lista de ciudades patrimonio, siendo una de las ciudades sin playa más visitadas en México La conservación de sus sitios y monumentos históricos es un punto importante para la conservar esta denominación.

Empleando la técnica de ultrasonido de emisión transmisión a nivel laboratorio, en esta investigación se buscó sentar las bases para la realización de diagnósticos más precisos sobre las condiciones de los elementos estructurales de madera en las edificaciones históricas. Se lograron obtener los parámetros elásticos de tres tipos de madera, una de reciente corta la cual fue analizada sin haber sido sometida a ningún tipo de tratamiento y otros dos tipos de madera, (material proveniente de dos vigas, del Museo Archivo Casa de Morelos las cuales se retiraron en 2010) esta madera presento daños biológicos y por esfuerzos de carga.

Se obtuvieron los valores de la velocidad longitudinal y transversal, el módulo de Young y de corte, así como la atenuación ultrasónica. Empleando el microscopio electrónico de barrido fue posible la observación de las condiciones físicas de estas tres maderas coincidiendo con los datos de las mediciones ultrasónicas. Comprobando así la posibilidad del empleo de esta técnica en casos reales.

Abstract

Mexico is one of the 162 countries that have places designated as World Heritage; being the third country with the highest number of cities inscribed on the Heritage List: it currently has 10 cities, only 6 less than Italy and 5 less than Spain

Morelia founded in the sixteenth century has 1,113 buildings, 260 historically relevant, 390 hectares, 219 blocks and 15 seats; in 1991, it entered the list of heritage cities, being one of the most visited cities without beach in Mexico. The conservation of its sites and historical monuments is an important point to preserve this denomination.

Using the ultrasound technique of emission transmission at the laboratory level, this research sought to lay the foundations for the realization of more precise diagnoses on the conditions of structural wooden elements in historic buildings. We managed to obtain the elastic parameters of three types of wood, one of recent cutting which was analyzed without having undergone any type of treatment and two other types of wood, (material from two beams, from the Museo Archivo Casa de Morelos which were removed in 2010) this wood presented biological damage and load stress.

The values of the longitudinal and transverse velocities and the Young's modulus were obtained, as well as the ultrasonic attenuation. Using the scanning electron microscope (SEM), it was possible to observe the physical conditions of these three woods coinciding with the data of the ultrasonic measurements. Checking the possibility of using this technique in real cases.

1 Introducción

Los principios de la conservación de las estructuras históricas en madera están contenidos en el estatuto del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS) en la 12ª asamblea general en México, en octubre de 1999. 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 por estructuras históricas en madera a todo tipo de construcción o edificio hecho en madera, total o parcialmente y que cuente con un significado cultural o que forme parte de un sitio histórico.

Debido al deterioro normal de los materiales, por distintos factores de degradación ya sea por factores naturales, medio ambientales o por el desgaste por el uso de estos, se deben realizar trabajos de mantenimiento. Para la conservación de dichas estructuras, se deben seguir estos principios:

- Reconocer la importancia de las estructuras en madera de todas las épocas como parte del patrimonio cultural mundial.
- Tener en consideración la diversidad de especies y de calidades de maderas utilizadas para su construcción.
- Reconocer la vulnerabilidad de las estructuras construidas total o parcialmente en madera, a causa del deterioro y degradación de los materiales expuestos a diferentes condiciones medioambientales o climáticas, a las variaciones en el grado de humedad, a luz, a los efectos nocivos de hongos e insectos, a la especulación, a los incendios y a otros accidentes.
- Reconocer la creciente escasez de las estructuras históricas en madera como consecuencia de su vulnerabilidad, de su caída en desuso y de la desaparición de los oficios artesanos relacionados con las técnicas de diseño y construcción tradicionales.
- Sopesar la gran diversidad de las medidas y tratamientos requeridos para la preservación y conservación de estos sitios históricos.
- Tener en cuenta los principios de la Carta de Venecia, así como la doctrina de ICOMOS y de la UNESCO, que tratan de que estos principios generales se apliquen a la protección y preservación de las estructuras en madera (Sites, 1999).

Los edificios con un carácter histórico no pueden ser intervenidos como se haría con cualquier otro inmueble. El buscar métodos y técnicas apropiadas para su preservación, es una de las preocupaciones principales de los restauradores. Muchos aspectos son importantes a considerar en esta tarea.

La inspección, recolección de datos y documentación son factores importantes antes de realizar cualquier intervención. El estado de la estructura y de sus elementos deberá ser cuidadosamente documentado, al igual que todos los materiales utilizados en los tratamientos. Esto 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.

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. (Sites, 1999).

Esto no impedirá las intervenciones menores que sean necesarias ni las medidas urgentes. La vigilancia y mantenimiento son de mucha importancia para mantener una estrategia coherente de vigilancia continua y de mantenimiento regular, para la conservación de las estructuras históricas de madera, así como para preservar su significación cultural.

El objetivo de la restauración es la conservación de las estructuras históricas. Así como revelar su valor cultural, mejorando la percepción de su integridad histórica, de sus estadios anteriores y de su concepción original. Dentro de los límites de las pruebas materiales históricas existentes, tal como se indica en los artículos 9 a 13 de la Carta de Venecia (monumentos, 1964).

La investigación efectuada en este trabajo brinda una herramienta más al área del conocimiento, permitiendo realizar mejores análisis de la manera estructural y diagnosticar problemas en estos elementos. Con esto es posible efectuar una intervención mejor al modificar o sustituir ciertos elementos estructurales que presenten daños de fatiga del material y que representan un riesgo para la seguridad de las personas y del edificio.

Los métodos de ensayos no destructivos permiten evaluar algunos defectos presentes en el interior de los materiales. Con esta técnica, es posible caracterizar la estructura interna de los materiales, como posibles ataques biológicos, nudos o roturas que interrumpen la continuidad del material; que alteran la estructura de la madera y su resistencia, mediante la interacción de la señal ultrasónica con la microestructura. El material puede ser evaluado con respecto a los cambios de velocidad ultrasónica y la pérdida de amplitud o atenuación, con la finalidad de efectuar una reparación y sustitución adecuada de las estructuras históricas. (Vazquez, 2015)

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 después de que habían estado en servicio durante un tiempo.

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. Por medio de la señal ultrasónica recibida, del medio en inspección, se puede definir e interpretar la presencia y localización de defectos, y discontinuidades en los materiales (Popp, 1990; 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:

- Reflexión del ultrasonido desde las interfaces, que consisten en límites o discontinuidades, dentro del mismo material.
- 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 aplicación de métodos no destructivos en el campo de la restauración es un aspecto que se contempla para la intervención de los edificios de carácter histórico, siendo una herramienta muy útil, (Sites, 1999). En México no se conoce en la actualidad algún grupo de especialistas que utilicen estas técnicas de restauración en elementos estructurales de madera. Esta investigación contribuye para que personas pertenecientes o interesadas en la restauración cuenten con otra técnica de inspección en casos reales de diagnósticos estructurales.

Se trabajó a nivel laboratorio mediante la utilización de probetas de tres maderas diferentes de pinos. Se empleó madera sana de reciente corta sin defectos y sin ningún tratamiento previo la cual se denominó como madera sana, también se analizaron dos vigas de pino de dos especies diferentes, la primera llamada viga 1 con un grado de deterioro de un 40% en relación a la madera sana y la viga 2 con un 80% de deterioro en relación con la madera sana. Las vigas 1 y 2 dado su estado de deterioro fueron retiradas durante una restauración efectuada en el Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos, recinto museográfico ubicado en el Centro Histórico de Morelia, en la Avenida Morelos.

La emisión de ondas se realizó sobre probetas de dimensiones menores que las dimensiones reales de los elementos estructurales de madera, pero significativas debido al tipo de técnica, y con una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia de la propia probeta, produciéndose una amplificación de la oscilación.

Los valores de elasticidad se dedujeron a partir de las frecuencias de resonancia, la densidad y las dimensiones de la probeta. Esto permitió contar con los parámetros necesarios que permitieron realizar las evaluaciones de estos tres tipos de materiales.

Encontrando que la viga denominada como 1 sufrió un grado de deterioro de un 40% en tanto que la madera de la viga denominada como viga 2 presentó un deterioro de un 80% esto en relación con la madera sana, la cual se consideró 100% saludable.

Como un complemento a esta técnica se efectuaron otras pruebas de laboratorio de tipo destructivo, pero poco invasivas para los elementos estructurares. Estas pruebas consistieron en la preparación de probetas para el microscopio electrónico de barrido, para el microscopio óptico y para la obtención de material disociado. Las imágenes obtenidas en los dos tipos de microscopios permitieron corroborar que las mediciones efectuadas con la técnica de emisión transmisión de ultrasonido, si reflejaban los grados de deterioro que estos materiales presentaban en las mediciones.

Con la finalidad de observar las diferentes condiciones de los tres tipos de madera empleados para esta investigación, de las probetas antes mencionadas se obtuvo del mismo material empleado para el estudio de ultrasonido, muestras de astillas para obtener material disociado y poder medir otras propiedades de los materiales como, longitud de traqueidas, espesor de pared celular y diámetro de lúmenes.

2 Antecedentes

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

En el campo de la conservación de sitios y monumentos históricos encontramos que España es uno de los países que ha presentado un gran interés en la conservación de los elementos de madera de 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.”

El artículo antes mencionado nos habla de cómo se han modificado las leyes y normas para la construcción en relación con el empleo de la madera como un material que está adquiriendo una nueva interpretación como material estructural. Se presenta por primera vez en una normativa, lo que supone un reto para explotar el potencial de este material estructural.

Esta norma ha disparado las necesidades de investigación, desarrollo e innovación y así lo demuestran las muchas líneas de investigación, que han surgido a raíz de la situación actual en el sector de la edificación. La elevada demanda de madera estructural en el mercado está haciendo muy necesaria y urgente la actualización del sector para asumir y dar respuesta a los retos planteados por el CTE (Herrero, et al., 2007).

En España se consideró que la implantación de un Código Técnico de la Edificación desde un punto de vista normativo era esencial. Surge con la necesaria de regular el sector de la Edificación

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).

Por primera vez en España es contemplada la madera en igualdad de condiciones con otros materiales, ofreciendo en edificación las mismas garantías de calidad y seguridad estructural que cualquiera de los otros materiales empleados en la construcción. La Directiva de Productos para la Construcción, desde 1998 viene implantando un sistema de certificación a los productos que se incorporan de manera permanente a la construcción. Implantar sistemas de producción y caracterización de madera y productos derivados para uso estructural son medidas encaminadas a garantizar sus propiedades mecánicas (Herrero, et al., 2007).

La revista Informes de la Construcción realiza a la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras (en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid) explica sobre su actividad investigadora y docente realizada en torno a la madera estructural durante más de 20 años de dedicación. La tecnología de la madera laminada encolada era un tema incluido en los programas de las asignaturas incluso antes de que en España comenzara su fabricación industrial. Una de las consecuencias de esta etapa pionera ha sido el hecho de que la Cátedra de Estructuras de la misma Escuela.

La labor iniciada en los años 60 por D. César Peraza Oramas, Catedrático de Tecnología de la Madera en la ETSI de Montes de Madrid, impartía docencia sobre construcción con madera y sus productos derivados para uso estructural desde los años 80.

La Ley de Ordenación de la Edificación, aprobada en 1999 y modificada en 2001. Abre un abanico de líneas de investigación tan extenso como necesario. Para la caracterización de madera en aserradero existen normas y procedimientos cuya aplicación en estructuras existentes resulta muy limitada, por lo que se hace necesario un nuevo enfoque para tratar de estimar las propiedades mecánicas de la madera puesta en obra (Herrero, et al., 2007).

El estudio de las técnicas no destructivas complementa a la clasificación visual (la cual puede resultar muy lenta cuando se requieren altos rendimientos) y mejorar la predicción de las propiedades mecánicas o para detectar discontinuidades en el material. Los primeros estudios realizados con ultrasonido introducción en España de las técnicas de vibraciones inducidas y el arranque de tornillos el Cálculo de Estructuras en la ETSI de Montes de Madrid. Todas estas innovaciones surgen a raíz de la necesidad de ampliar el conocimiento de la madera sin destruirla.

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).

Los edificios con un carácter histórico no pueden ser intervenidos como se haría con cualquier otro inmueble, el buscar métodos y técnicas apropiadas para la realización de su preservación es una de las preocupaciones principales de los restauradores, muchos aspectos son importantes a considerar en esta tarea. La inspección, recogida de datos y documentación son factores importantes a considerar antes de realizar cualquier intervención.

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.

Estas técnicas están siendo investigadas en la Escuela de Arquitectura de Sevilla y en la EUIT Forestal de la UPM, así como en la Universidad de Valladolid con los equipos de la Escuela de Arquitectura y del laboratorio de Maderas de la Escuela de Ingenierías Agrarias en Palencia, en el que se han realizado ensayos de caracterización sobre más de 2.500 vigas de madera de *pino pinaster* (Herrero, et al., 2007).

Existen varios motivos por los que la tipología estructural en madera tiende hacia la construcción de estructuras isostáticas y, por tanto, a uniones articuladas. Sin embargo, también existen sistemas que permiten la ejecución de uniones rígidas. La construcción tradicional con madera se basa en la ejecución de uniones carpinteras en las que la transmisión de esfuerzos se realiza principalmente por contacto directo entre superficie de madera (Herrero, et al., 2007).

En esta línea se han realizado algunos esfuerzos de investigación para recuperar la tipología de los detalles constructivos tradicionales en madera. En otro orden, son destacables los trabajos realizados en la Escuela Politécnica Superior de Lugo para modelizar con el Método de Elementos Finitos el comportamiento mecánico de este tipo de uniones.

El diseño estructural tampoco es ajeno a la innovación y en la ETS de Arquitectura de La Coruña se vienen desarrollando estudios avanzados sobre mallas planas y espaciales mediante barras de madera y diversos sistemas de unión que cuentan con algunas patentes y modelos de utilidad.

En los trabajos de intervención sobre edificios con estructura de madera convergen muchos temas diferentes. La caracterización de la madera para estimar sus propiedades mecánicas, las técnicas de inspección para el diagnóstico de las patologías, el diseño de soluciones de refuerzo, etc., son líneas de trabajo e investigación que se están desarrollando.

2.1.1. El proceso de inspección de las estructuras de madera de una edificación en un centro urbano, en el caso de España consiste en:

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, et al., 2006).

Arriaga (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, et al., 2006).

El contenido que incluye cada ficha, de forma aproximada, es el siguiente:

- 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.
 - Medidas de carácter estructural.

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, su fuera necesario, no solo en comprobaciones de las condiciones físicas, sino también en métodos basados en pruebas no destructivas (Sites, 1999).

Esto no impedirá las intervenciones menores que sean necesarias ni las medidas urgentes. La vigilancia y mantenimiento son de mucha importancia para mantener una estrategia coherente de vigilancia continua y de mantenimiento regular para la conservación de las estructuras históricas de madera, así como para preservar su significación cultural (Sites, 1999).

Con la finalidad de permitir evaluarlos y poder efectuar una intervención mejor al intentar modificar y sustituir en la manera de lo posible la menor cantidad de elementos. Los métodos de ensayos no destructivos permite evaluar algunos defectos presentes en el interior del material, como posibles ataques biológicos que alteran la estructura de la madera, nudos o roturas que interrumpen la continuidad del material (Sites, 1999).

La conservación de las estructuras históricas y de la función que le es inherente, se indica en los artículos 9 al 13 de la Carta de Venecia, así como revelar su valor cultural mejorando la percepción de su integridad histórica, de sus estadios anteriores y de su concepción original, dentro de los límites de las pruebas materiales históricas existentes.

Actualmente, en el Cálculo de Estructuras en España se han realizado esfuerzos de investigación e innovación importantes en el campo de la utilización de técnicas no destructivas para la peritación de estructuras existentes. El perfil predominante en los grupos de investigación se basa en la presencia de Ingenieros de Montes o Forestales y de Arquitectos. Son las Escuelas de Arquitectura y las Escuelas de Ingenieros de Montes los centros en los que más volumen de actividad se ha podido constatar, y en los centros de investigación es el mismo perfil el que predomina entre el personal investigador (Herrero, et al., 2007) .

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

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.

Por lo que ha sido más que evidente la efectividad de esta técnica no destructiva, ha dado la pauta para el desarrollo y aplicación en todos los aspectos de la caracterización de materiales. Actualmente los esfuerzos de investigación han sido dirigidos hacia el desarrollo y perfeccionamiento de ésta técnica no destructiva, tales como monitoreo de los procesos de producción, integridad de los materiales durante su transporte, almacenamiento y fabricación y la cantidad y velocidad de degradación durante el servicio (Nagy, 1999 a; Nagy, 1999 b).

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:

Reflexión del ultrasonido desde las interfases que consisten en límites o discontinuidades dentro del mismo material.

- 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.

Su principal aplicación en la inspección de metales es la detección y caracterización de defectos internos; también es usado para detectar defectos superficiales, para definir características de una unión, para medir el espesor y magnitud de la corrosión y para determinar propiedades físicas, estructura, tamaño de grano y constantes elásticas (Chen, 2013).

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).

2.3. Utilización de Técnicas de Ultrasonido en la madera.

Como ya se ha mencionado en este trabajo la utilización de Técnicas de Ultrasonido, pueden caracterizar la estructura interna de los materiales, la interacción de la señal ultrasónica con la microestructura puede ser evaluado con respecto a los cambios de velocidad ultrasónica y la pérdida de amplitud o atenuación, esto con la finalidad de efectuar una reparación y sustitución adecuada de las estructuras históricas.

Sotomayor (2015), nos habla que el módulo de elasticidad es necesario para el cálculo de la rigidez de elementos estructurales. Igualmente, la densidad y la velocidad de onda son propiedades importantes que tomar en cuenta. El objetivo de su investigación fue determinar la velocidad de transmisión de onda y el módulo de elasticidad en la madera de *Swietenia humilis*, *Alnus acuminata*, *Fraxinus americana* y *Fraxinus uhdei*, empleando el método de evaluación no destructivo de ondas de esfuerzo. Los resultados mostraron que existe una diferencia significativa entre las medias de las 4 variables con un nivel del 95%. Las pruebas de ondas de esfuerzo consistieron en medir el tiempo de transmisión de una onda a través de la longitud de la probeta. Para las pruebas se empleó el aparato Metriguard.

“En Ingeniería de la madera, el módulo de elasticidad de la madera es necesario para el cálculo de su rigidez estructural, independientemente de la especie modifiquen su respuesta estructural, tales como el contenido de humedad. Una opción para la determinación del módulo de elasticidad de elementos estructurales es la aplicación de métodos de evaluación no destructivos. Los métodos de evaluación no destructivos se caracterizan principalmente por su rapidez, bajo costo y por no afectar la estructura física del material en estudio” (Sotomayor, 2015).

En el trabajo de Sotomayor (2015), encontramos que la velocidad de las ondas de esfuerzo disminuye recíprocamente con el aumento del contenido de humedad. El módulo de elasticidad por ondas de esfuerzo presenta un valor mínimo alrededor del punto de saturación de la fibra.

Sotomayor (2015), cita a Kang y Booker (2002) el cual estudio la variación de la velocidad de ondas de esfuerzo en relación con el contenido de humedad de la madera de *Pinus radiata*. Los autores encuentran que en la madera la velocidad de las ondas de esfuerzo decrece cuando aumenta el contenido de humedad en este material y proponen que un análisis de regresiones entre la velocidad y el módulo de elasticidad de los materiales puede ser útil para predecir sus propiedades de resistencia.

La velocidad de ondas de esfuerzo es independiente del largo de la probeta. Así mismo la velocidad disminuye fuertemente cuando el contenido de humedad de la madera se incrementa del estado anhidro al punto de saturación de la fibra y a partir de este punto la velocidad decrece a una tasa menor respecto al incremento de contenido de humedad (Sotomayor, 2015).

Sotomayor (2015), cita en el mismo contexto, a Ross et al. (2005), quienes utilizan ondas de esfuerzo longitudinales para evaluar las correlaciones entre las propiedades mecánicas de la madera y la de trozas de *Pseudotsuga menziesii*. Entre sus principales conclusiones los autores encuentran fuertes correlaciones entre los valores de la velocidad de transmisión de ondas de esfuerzo entre árboles, troncos y madera aserrada.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos por Sotomayor (2015) titulado Velocidad de Onda de Esfuerzos y Módulos de Elasticidad de 4 Maderas Mexicanas, donde se muestran las densidades, la velocidad de onda de esfuerzo, el módulo de elasticidad, la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación resultantes de su investigación, (ver figura 2.1)

	ρ_{CH} (kg/m ³)	V_{oe} (m/s)	E_{oe} (MPa)
<i>Swietenia humilis</i>			
\bar{x}	807	3,433	9,556
Σ	33.40	331.12	1,710
CV	4.14	9.65	17.89
<i>Alnus acuminata</i>			
\bar{x}	589	4,240	10,607
Σ	23.57	214.43	1,071
CV	4.00	5.06	10.09
<i>Fraxinus americana</i>			
\bar{x}	656	4,132	11,212
Σ	35.49	198.05	1,172
CV	5.41	4.79	10.46
<i>Fraxinus uhdei</i>			
\bar{x}	651	3,939	10,122
σ	30.96	132.76	978.83
CV	4.76	3.37	9.67
ρ_{CH} = Densidad; V_{oe} = Velocidad de ondas de esfuerzo; E_{oe} = Módulo de elasticidad; \bar{x} = media aritmética; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación (%).			

Figura 2. 1 Tabla de resultados del artículo (Sotomayor Castellanos, 2015, pp. 34-42) donde se muestran las densidades, la velocidad de onda de esfuerzo, el módulo de elasticidad, la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación resultantes de su investigación

El carácter anisotrópico de la madera le confiere versatilidad para el diseño de productos y estructuras. Por esta razón Sotomayor (2015) , nos habla de determinar el módulo de elasticidad y resistencia en compresión en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de madera de *P. michoacana*, *P. douglasiana* y *P. pringlei*.

En el artículo titulado *Anisotropía del Módulo de Elasticidad y de Resistencia en Compresión de la Madera de Pinus Douglasiana y pinus pringlei*, se realizaron ensayos de compresión y se determinó su contenido de humedad y su densidad básica. Para cada una de las especies, los resultados del análisis de varianza entre las direcciones radial, tangencial y longitudinal del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión indicaron una diferencia significativa entre las medias de los valores de las tres direcciones para los parámetros elásticos y resistentes. Estos resultados confirman que las propiedades elásticas y mecánicas de la madera varían según la dirección en que se miden, verificando el carácter anisotrópico del material (Sotomayor, 2014).

Sotomayor (2015), cita a Mascia & Vanalli, (2012), que la magnitud del módulo de elasticidad y de la resistencia mecánica de la madera varía según las direcciones radial, tangencial y longitudinal, debido a que la madera es un material anisotrópico

Sotomayor (2015), cita a (Dávalos, 1996), donde dice que el conocimiento del módulo de elasticidad y de la resistencia en compresión en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de la madera es útil para el diseño basado en la confiabilidad estructural. Para determinar las propiedades elásticas y mecánicas en las direcciones principales de la madera, usualmente se realizan ensayos de compresión en pequeñas probetas orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, y libres de particularidades de crecimiento, tales como nudos y/o desviación de la fibra. Estos experimentos están establecidos en normas, como la American Society for Testing and Materials International (ASTM) D143-09 (ASTM International, 2009) y la International Organization for Standardization (ISO) 3129:2012 (ISO, 2012)

En la mayoría de los trabajos enfocados al estudio de la madera por las técnicas no destructivas. Se encontró que las normas para estas pruebas están basadas en los lineamientos ya establecidos en Norte América y por la comunidad europea. También se encontró que las maderas estudiadas pertenecen a las áreas geográficas ya mencionadas.

“Como resultado, los datos obtenidos con normas desarrolladas para condiciones específicas de Norteamérica, Latinoamérica y Europa no necesariamente son apropiados para las condiciones del país. Por ello es necesario desarrollar métodos de investigación adecuados para conocer las propiedades de las maderas endémicas del estado de Michoacán,” (Sotomayor, 2014).

Sotomayor (2015) cita a Sotomayor Castellanos (2005) en donde indica valores de resistencia mecánica y elástica, también nos recuerda en donde (Sotomayor Castellanos, Guridi Gómez & García Moreno, 2010) determinan módulos de elasticidad por ultrasonido, finalmente nos habla de (Sotomayor Castellanos, García Mariscal, Moya Lara & Olguín Cerón, 2010) en donde calculan los valores en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de las velocidades del ultrasonido y de los módulos de elasticidad dinámicos.

En las investigaciones citadas en el párrafo anterior es posible saber que las propiedades en la dirección longitudinal de la madera son significativamente superiores a las propiedades en las direcciones tangencial o radial, indicando el carácter anisotrópico del material. La figura 2.2 muestra los resultados obtenidos por Sotomayor (2015), ver figura 2.2-

Tabla 1.

Resultados de las pruebas de compresión.

	Dirección radial (r)				Dirección tangencial (t)				Dirección longitudinal (l)			
	ρ_o	CH	Er	Rr	ρ_o	CH	Et	Rt	ρ_o	CH	El	Rl
	kg/m ³	%	MPa	MPa	kg/m ³	%	MPa	MPa	kg/m ³	%	MPa	MPa
<i>Pinus michoacana</i>												
\bar{X}	369	10.36	489	4.82	371	10.42	289	6.19	367	10.30	2199	32.84
σ	12.81	0.12	103	0.48	17.99	0.12	29.14	0.49	11.24	0.14	307	1.94
CV	0.03	0.01	0.21	0.10	0.05	0.01	0.10	0.08	0.03	0.01	0.14	0.06
<i>Pinus douglasiana</i>												
\bar{X}	377	10.35	386	4.98	369	10.60	296	5.82	355	10.39	1597	36.30
σ	5.00	0.72	66	0.33	14.80	0.21	30.96	0.24	4.03	0.18	123.82	1.64
CV	0.01	0.07	0.17	0.07	0.04	0.02	0.10	0.04	0.01	0.02	0.08	0.05
<i>Pinus pringlei</i>												
\bar{X}	460	10.52	649	7.02	451	10.71	419	8.12	496	10.70	3206	48.36
σ	21.36	0.13	106	0.59	15.09	0.11	128	0.71	24.22	0.11	817	3.39
CV	0.05	0.01	0.16	0.08	0.03	0.01	0.31	0.09	0.05	0.01	0.26	0.07

ρ_o : Densidad básica; CH: contenido de humedad; E: módulo de elasticidad en compresión; R: resistencia de compresión; r: dirección radial; t: dirección tangencial; l: dirección longitudinal. \bar{X} : media aritmética; σ : desviación estándar; CV: coeficiente de variación.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. 2 Tabla 1 del artículo Anisotropía del Módulo de Elasticidad y de Resistencia en Compresión de la Madera de *Pinus Douglasiana* y *Pinus Pringlei*, Sotomayor (2015), donde se muestran la densidad básica, el contenido de humedad, el módulo de elasticidad en compresión, la resistencia de compresión, en las direcciones radial, tangencial y longitudinal, la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

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).

Los resultados de este trabajo mostraron mayor anisotropía elástica para las latifoliadas que para las coníferas y una relativa simetría en las velocidades de propagación transversal y los módulos de corte a lo largo de las tres principales direcciones del árbol. También los valores medios de los módulos de elasticidad calculados por ultrasonido resultaron entre 25 y 47 % más altos que los medidos por ensayos mecánicos.

En la Tabla 2, de este artículo el autor muestra algunos valores redondeados de la longitud de onda que se presentan en distintas especies de maderas, en donde podemos observar los Valores de la Velocidad y Longitud de Onda, Densidad, velocidad de propagación y Módulos de elasticidad a condiciones climáticas estándar (20° C / 65% HR) a lo largo de las tres direcciones principales, en distintas especies de madera, (ver figura 2.3) (Baradit, 2013)

Especie		Densidad (kg/m ³)	V _{LL} (m/s)	V _{RR} (m/s)	V _{TF} (m/s)	E _{LL} (MPa)	E _{RR} (MPa)	E _{TT} (MPa)
Tepa	x	560	4684	2052	1163	12371	2360	758
(<i>Laureliopsis philippiana</i>)	s	16	281	64	36	1783	152	36
	cv	2,85	6	3,12	3,09	14,41	6,44	4,75
Olivillo	x	546	4857	1942	1119	13046	2043	685
(<i>Aextoxicon punctatum</i>)	s	7	291	123	63	2867	148	106
	cv	12,82	5,99	6,33	5,6	21,9	7,2	15,47
Laurel (<i>Laurelia sempervirens</i>)	x	472	4900	2050	1211	11391	1982	692
	s	29	217	63	33	1436	137	48
	cv	6,14	4,43	3,07	2,72	12,6	6,91	6,5
Lenga	x	512	4918	2078	1190	12380	2215	727
(<i>Nothofagus pumilio</i>)	s	27	101	56	47	758	205	70
	cv	5,27	2,05	2,69	3,95	6,12	9,25	10,72
Alerce (<i>Platycarya cupressoides</i>)	x	412	4303	1865	1440	8732	1466	858
	s	19	108	267	61	1027	450	90
	cv	4,6	4,1	14	4,2	11,8	30,7	10,4
Mañío	x	561	5000	2153	1610	14027	2599	1465
(<i>Podocarpus nubigena</i>)	s	21	54	51	145	975	149	279
	cv	3,74	3,08	2,37	9,01	6,95	5,73	19

Figura 2. 3 Tabla de resultados obtenidos para especies chilenas, donde se observan el valor medio, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la Velocidad de Propagación, el módulo de Elasticidad, la dirección longitudinal, la dirección radial y la dirección tangencial. (Baradit, 2013)

Estos estudios anteriores muestran como las técnicas no destructivas y especialmente las de ultrasonido están obteniendo más importancia en el estudio de la madera. La obtención de sus propiedades físicas como su módulo de elasticidad y de corte, son valores importantes para el uso de este material de forma estructural. Existen otros trabajos que se enfocan en el estudio de la madera estructural para edificaciones ya en uso, en donde se calculan y se hacen diagnósticos de su tiempo de vida.

Sotomayor (2014) cita en su trabajo a (COST Action FP0802, 2011) y nos menciona que las tipologías arquitecturales encontradas en el contexto del análisis estructural de construcciones históricas son complejas. Entre otros problemas, los componentes no pueden ser desmantelados para evaluar sus propiedades materiales con métodos destructivos. De tal forma, que el modelado numérico es propuesto como una solución para diagnosticar su seguridad estructural. Esta investigación presenta un caso de estudio en vigas de madera antigua donde se contrastan resultados experimentales de pruebas de flexión estática, con sus predicciones numéricas empleando el método del elemento finito.

Se han realizado pruebas de flexión estática de acuerdo con la norma Europea EN 408, donde se calcularon los módulos de elasticidad y de ruptura en 5 vigas antiguas de *Picea abies*. En donde la densidad de la madera fue de 422 kg/m³ para las vigas con un contenido de humedad de 12 %. El módulo de elasticidad promedio fue de 9,059 MPa y el módulo de ruptura fue de 29.18 Pa (Sotomayor, 2014).

Sotomayor (2014) nos menciona que las pruebas de flexión estática son uno de los principales métodos para evaluar las propiedades mecánicas de la madera. Él emplea las normas Europeas EN 408 y EN 384 (ECS, 2003 y ECS, 2004), para la realización de sus pruebas de flexión estática.

Sotomayor (2014) cita a (Olsson y col., 2010 y 2012) y a (Calderoni y col., 2006 y Faggiano y col., 2011) y nos indica que la densidad de la madera, su contenido de humedad, así como de sus propiedades de anisotropía del material son factores importantes en estos análisis y por otra, de la configuración y de la velocidad de los experimentos.

En el artículo de Sotomayor (2014) al hablar de las pruebas de flexión estática y de cómo son utilizadas para determinar los módulos de elasticidad y de ruptura, él cita a (Hansson y Antti, 2003 y Arnold y Steiger, 2006) en donde se menciona que ambos parámetros son imprescindibles al diseño estructural en el modelado numérico y son empleados como referencias en inspecciones in-situ de elementos estructurales. La figura 2.4 muestran los resultados del estudio de las 5 vigas antiguas de *Picea abies*.

Tabla 1. Contenido de humedad, densidad, módulos de elasticidad y de ruptura.

Viga	H (%)	ρ_H (kg/m ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	13,14	448	10929	32,372
2	11,08	414	8320	33,938
3	11,79	449	8433	31,423
4	11,41	366	7488	16,659
5	12,16	433	10126	31,486
Promedio	11,92	422	9059	29,176
Desviación estándar	0,80	34,4	1420	7,070
CV (%)	6,7	8,2	15,7	24,2

Figura 2. 4 Tabla de resultados obtenidos para las 5 vigas antiguas de *Picea abies*, donde se observan el valor del contenido de humedad, la Densidad, el módulo de Elasticidad y de ruptura, (Sotomayor, 2014)

“Los principios del análisis estructural en Ingeniería son de aplicación universal. Su adaptación a las condiciones de México depende del empleo de las características materiales propias de las especies de maderas mexicanas y del ajuste de las condiciones de servicio de las estructuras en el país. La fiabilidad de un sistema estructural es la probabilidad de que su rendimiento sea el esperado en una situación dada. El análisis de un sistema está normalmente controlado por la intervención de diferentes variables, algunas representando las propiedades mecánicas y geométricas de la estructura y otras caracterizando los requerimientos y/o cargas. Normalmente estas variables son inciertas y aleatorias y solamente pueden ser descritas en términos estadísticos y de probabilidad” (Sotomayor, 2017).

Sotomayor (2017) presenta que es posible emplear las funciones de modificación para resistencia y rigidez, los criterios de actualización de acciones, características materiales básicas y complementarias. Las consideraciones generales necesarias para aplicar un enfoque probabilístico al análisis de estructuras de madera. Él sostiene que con la actualización de los valores de las características materiales y de las acciones sobre una estructura en servicio, es posible el análisis estructural de edificaciones antiguas de madera. Describiendo los criterios de comportamiento estructural de confiabilidad y de servicio, así como las funciones de estado límite correspondientes.

Sotomayor (2017) cita que la propuesta de su trabajo está basada en la información publicada en el Código Europeo EC5 (European Committee for Standardization, 2004) y en el Código del Modelo Probabilístico de la Comisión Mixta en Seguridad Estructural (Joint Committee On Structural Safety, 2006). Él menciona que las ideas de ese proyecto han sido analizadas por varios autores como: Foschi et al. (1989), Diamantidis (2001), Köhler et al. (2007) y Dietsch y Köhler (2010).

Los criterios de comportamiento estructural de confiabilidad y de servicio son establecidos de acuerdo con las siguientes desigualdades: Confiabilidad (Resistencia > Efecto de carga), Servicio (Deflexión límite > Deflexión). Estos criterios pueden ser asimismo definidos por las funciones de estado límite: Confiabilidad (Resistencia - Efecto de carga aplicada) y Servicio (Deflexión límite – Deflexión real) (Sotomayor, 2017).

Las características materiales básicas de la madera estructural son: Resistencia al momento en flexión (MPa), Módulo de elasticidad en flexión (MPa) y Densidad (kg/m^3). Las características materiales complementarias de la madera estructural son: Resistencia al esfuerzo de tensión paralela a la fibra (MPa), Resistencia al esfuerzo de tensión perpendicular a la fibra (MPa), Módulo de elasticidad paralela a la fibra (MPa), Módulo de elasticidad perpendicular a la fibra (MPa), Resistencia al esfuerzo de compresión paralela a fibra (MPa), Resistencia al esfuerzo de compresión perpendicular a fibra (MPa). Resistencia al esfuerzo cortante (MPa) y Módulo de rigidez en cortante (MPa) (Sotomayor, 2017).

Sotomayor (2017) nos expresa que las características materiales complementarias son estimadas a partir de las características materiales básicas. Un Estado Límite Último es un estado el cual, al ser rebasado, la estructura completa o una parte de esta puede colapsar al superar su capacidad resistente. Un Estado Límite de Servicio es un tipo de estado que, de ser rebasado, produce una pérdida de funcionalidad o deterioro de la estructura, pero no un riesgo inminente a corto plazo.

En el artículo de Sotomayor (2017) llamado *Análisis estructural de edificaciones antiguas de madera. Consideraciones generales*, en la Tabla 4 de este documento encontramos las Funciones y modificación para la resistencia y la rigidez. Los valores para las funciones modificación para la resistencia α ($\text{Ex}(\cdot)$) y para las funciones modificación para la rigidez δ ($\text{Ex}(\cdot)$), para riesgos de la estructura a las acciones s , w y T durante el intervalo $[0, t]$, para diferentes contenidos de humedad de la madera (ω), (ver figura 2.5).

Clase de servicio	Permanente	Largo término	Medio término	Corto término	Instantáneo
Resistencia	t > 10 años	0.5 < t > 10 años	0.25 < t < 6 meses	t < 1 semana	t ≈ 0
1: ω =12%	α = 0.60	α = 0.70	α = 0.80	α = 0.90	α = 1.10
2: ω =20%	α = 0.60	α = 0.70	α = 0.80	α = 0.90	α = 1.10
3: ω =20%	α = 0.5	α = 0.55	α = 0.65	α = 0.70	α = 0.90
Clase de servicio	Permanente	Largo término	Medio término	Corto término	Instantáneo
Rigidez	t > 10 años	0.5 < t > 10 años	0.25 < t < 6 meses	t < 1 semana	t ≈ 0
1: ω =12%	δ = 0.60	δ = 0.50	δ = 0.25	δ = 0.0	δ = 0.0
2: ω =20%	δ = 0.80	δ = 0.50	δ = 0.25	δ = 0.0	δ = 0.0
3: ω =20%	δ = 2.00	δ = 1.50	δ = 0.75	δ = 0.30	δ = 0.0

Figura 2. 5 Tabla de Funciones modificación para la resistencia y la rigidez. Los valores para las funciones modificación para la resistencia $\alpha(\text{Ex}(\cdot))$ y para las funciones modificación para la rigidez $\delta(\text{Ex}(\cdot))$, para riesgos de la estructura a las acciones s , ω y T durante el intervalo $[0,1]$, para diferentes contenidos de humedad de la madera (ω), (Sotomayor, 2017)

Sotomayor (2017) nos plantea que la madera de especies mexicanas presenta una diversidad en sus características mecánicas. Citando a (Silva-Guzmán et al. 2010) menciona que, en México, ha sido recopilada información sobre las características mecánicas estáticas de especies de maderas. Respecto a información de módulos de elasticidad determinados por métodos no destructivos, la literatura es escasa nos comenta, con excepción de Sotomayor-Castellanos et al. (2010).

Sotomayor (2017) nos cita a (Kawamoto y Williams, 2002) hablando de las técnicas no destructivas, han demostrado su efectividad para determinar la velocidad de onda y el módulo de elasticidad dinámico de la madera, parámetro de referencia para el diseño de productos y de estructuras de madera funcionando en condiciones dinámicas.

Sotomayor (2017) citando a (Spycher et al. 2008; Wegst, 2008), comenta que la velocidad de onda y la frecuencia natural de piezas de madera son propiedades empleadas en el diseño de productos de madera con vocación para aplicaciones acústicas.

El objetivo de la investigación de Sotomayor (2017) del trabajo nombrado *Variación del módulo de elasticidad dinámico de la madera según la técnica de evaluación*, fue determinar los módulos de elasticidad dinámicos de la madera de *Cedrela odorata* (Cedro rojo) (52 probetas) y *Platymiscium dimorphandrum* (Hormiguillo) (34 probetas) y analizar las posibles causas de su variación. Utilizo probetas con dimensiones de 20 mm x 20 mm x 320 mm, orientadas en las direcciones radial, tangencial y longitudinal de acuerdo a las recomendaciones de la norma de la Organización Internacional para la Estandarización (International Organization for Standardization, 2012). Tomando en cuanto el contenido de humedad (H en %) y la densidad (ρ_H en kg/m^3) Se midieron las velocidades de onda (v en m/s) y las frecuencias naturales (f_{vt} en Hz) necesarias para el cálculo de los módulos de elasticidad (E en Pa) por ultrasonido (us), ondas de esfuerzo (oe) y vibraciones transversales (vt).

“Los valores experimentales del módulo de elasticidad dinámico de la madera determinados en un mismo grupo de especímenes, varían según la técnica empleada. Se efectuaron pruebas de ultrasonido, ondas de esfuerzo y vibraciones transversales y se determinaron los módulos de elasticidad de la madera de *Cedrela odorata* y *Platymiscium dimorphandrum* correspondientes. Los resultados mostraron diversidad entre especies y métodos de prueba. Se concluye que los módulos son diferentes conforme a la técnica experimental empleada. Se proponen como causas, la variabilidad de la madera, el contenido de humedad, la anisotropía material y el tipo de sollicitación mecánica en cada una de las pruebas” (Sotomayor, 2017).

Las imágenes siguientes muestran cómo Sotomayor (2017) efectuó las pruebas por ultrasonido y de ondas de esfuerzo, en donde él mide el tiempo de transmisión de la onda a través de la probeta (ver figura 3.6 A y B).

Él calculó la velocidad y determinó el módulo de elasticidad. En tanto que para las pruebas de vibraciones transversales él mide la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta (ver figura 2.6 C y D).

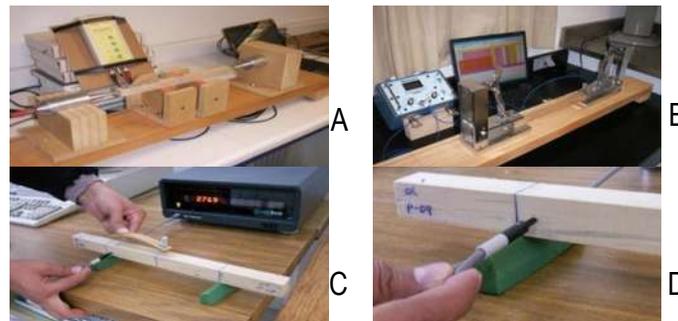


Figura 2. 6 Dispositivos para pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo, (A y B), dispositivo para pruebas de vibraciones transversales, (C y D) (Sotomayor Castellanos, 2017).

Sotomayor (2017) cita a (Hernández-Maldonado, 2010) y compara los valores estimados para los datos estimados por este modelo, se refieren a sollicitaciones en la dirección longitudinal, las cuales coinciden con las aplicadas en las pruebas de ultrasonido y ondas de esfuerzo. Por su parte el modelo FITECMA para estimación de características mecánicas de maderas mexicanas: $MOE = 191,045 \rho_H^{1.02}$ (Sotomayor-Castellanos, 2005), produce valores para módulos de elasticidad en flexión. Estos modelos de predicción consideran un contenido de humedad de la madera del 12%, valor diferente en un 2% al de la muestra experimental.

“Los resultados denotan la influencia de la variabilidad de la madera, del contenido de humedad y de las propiedades de anisotropía material de la madera. Por otra, la velocidad y la orientación de la sollicitación mecánica en cada una de las pruebas parece influir en la magnitud de los módulos de elasticidad dinámicos de la madera de *C. odorata* y *P. dimorphandrum*,” ver figura 2.7 (Sotomayor, 2017).

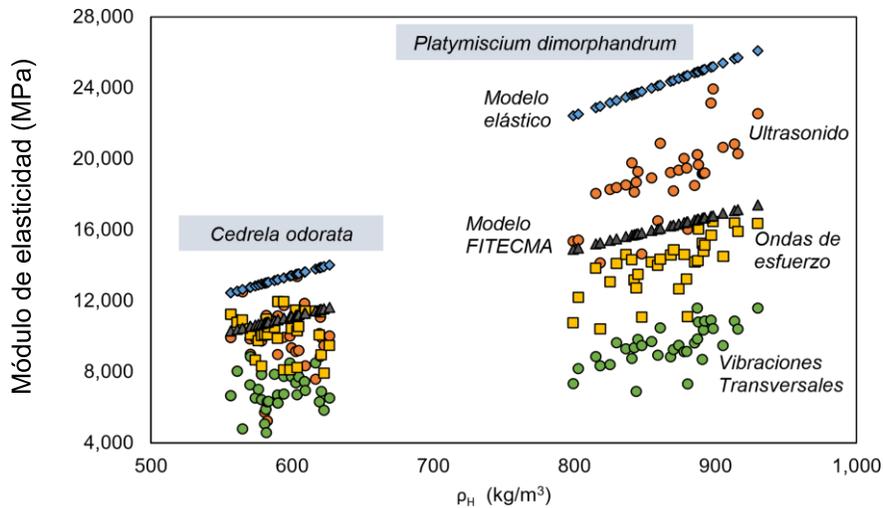


Figura 2. 7 Dispersión de los datos experimentales para cada especie y según las diferentes pruebas realizadas, (Sotomayor Castellanos, 2017)

Durante el proceso de revisión de artículos relacionados con la técnica de emisión transmisión de ultrasonido en madera se encontró uno que tiene bastantes similitudes con este trabajo de investigación, en este trabajo las maderas de las vigas 1 y 2 presentan ataque de hongos, como en la investigación de McGovern (2011), él nos dice que utilizo muestras de forma cubica de pino *Loblolly pine (Pinus taeda)* las cuales se expusieron al hongo *Gloeophyllum (Gloeophyllum trabeum)* durante periodos de tiempo que fueron de una semana a doce semanas.

McGovern (2011) 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 (2011) realizo mediciones utilizando transductores ultrasónicos longitudinales y de cizalla con una frecuencia central de 100 kHz. Utilizó una línea de retardo de acero debido al tamaño relativamente pequeño de las muestras de madera en relación con las longitudes de onda utilizadas.

McGovern (2011) desarrolló un método de prueba estándar ASTM4 para conservantes de madera mediante cultivos de bloque de suelo de laboratorio (D 1413-99). Esta norma proporciona un método de prueba para determinar la cantidad mínima de conservante que es eficaz para prevenir (es decir, "retrasar") la descomposición de especies de madera seleccionadas por hongos seleccionados en condiciones óptimas de laboratorio.

McGovern (2011) realizo bloques que contenían de 6 a 10 anillos por pulgada (2.5 a 4 anillos por cm). Los bloques fueron orientados para asegurar que los anillos fueran casi paralelos a la cara exterior del cubo, (ver figura 6.7)

Mientras que los cubos de madera no fueron impregnados con una solución preservante, fueron llevados a un equilibrio de humedad constante de 30% humedad relativa a 27°C durante tres semanas y su peso se midió al 1 / 100 gr más cercano antes de someterlos al proceso de descomposición.

“Los bloques se orientaron con los granos perpendiculares al plano de la tira (ver figura 1 que también ilustra el sistema de coordenadas asignado a los bloques utilizados en este estudio). Estos doce grupos de cinco bloques cada uno permanecieron en contacto con la banda alimentadora desde una semana hasta doce semanas. Al final de cada semana, se eliminó un grupo de cinco bloques y se pesó cada uno de los cinco bloques al 1/100 gr más

La figura 2.8 también muestra dos bloques para una comparación visual; un bloque no tiene decaimiento (es uno de los bloques de control) y el otro bloque estuvo expuesto al proceso de decaimiento controlado durante diez semanas” (McGovern, 2011).

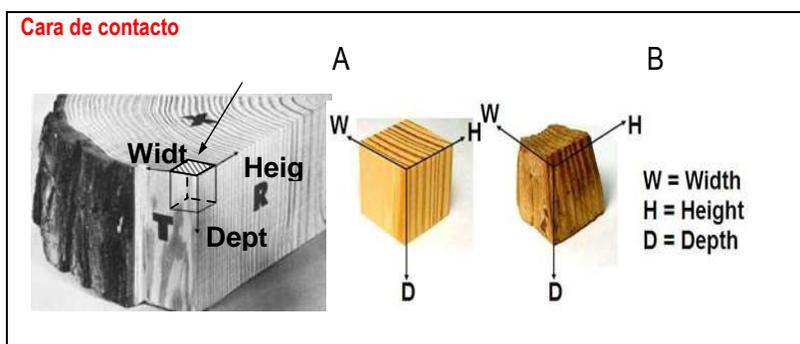


Figura 2. 8 (A) A Sistema de coordenadas de referencia asignado para los cubos de madera y la terminología utilizada en este estudio; (B) Bloque de madera sana (izquierda) vs. bloque de madera expuesto a diez semanas de descomposición controlada (derecha)” (McGvem, 2011)

McGovern (2011) en la Figura 2.9 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 (2.5.4 mm) 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 2. 9 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 (2011)

Las tablas 1 (ver figura 3.10) y 2 (3,11) de McGovern (2011) muestran los coeficientes para los diversos ajustes polinomiales para las velocidades y las atenuaciones correspondientes, respectivamente, en función de la frecuencia y el porcentaje de pérdida de masa para las nueve direcciones medidas diferentes.

Principal Material Direction	Polarization	Velocity* (m/s)						R ²	Valid Frequency Range (kHz)	μfreq x10 ⁵ (Hz)	σfreq x10 ⁴ (Hz)
		V(x,y) = A _v + B _v x + C _v y + D _v x ² + E _v x·y + F _v y ²									
		A _v	B _v	C _v	D _v	E _v	F _v				
Longitudinal	Longitudinal (LL)	5167	-423.4	250.9	-88.74	4.661	-100.5	0.91	35 – 200	1.175	4.793
	Radial (LR)	1726	-131.9	526.3	49.52	-55.14	-58.21	0.96	35 – 180	1.083	4.231
	Tangential (LT)	1700	-107.4	452.7	-15.19	-44.47	-80.24	0.93	30 – 150	0.916	3.614
Radial	Radial (RR)	1561	-303.0	13.68	-62.88	10.93	8.170	0.91	25 – 200	1.125	5.082
	Longitudinal (RL)	678.6	-105.4	129.8	5.154	-4.587	5.988	0.86	45 – 200	1.236	4.407
	Tangential (RT)	780.2	-97.37	117.0	1.363	4.947	-17.39	0.81	55 – 180	1.190	3.791
Tangential	Tangential (TT)	1393	-218.0	137.1	-17.17	-50.84	85.97	0.89	20 – 140	0.796	3.509
	Longitudinal (TL)	684.7	33.14	99.23	-0.2264	5.375	-16.64	0.81	45 – 180	1.160	3.967
	Radial (TR)	615.8	-85.04	94.93	-5.349	-2.458	-15.17	0.90	45 – 200	1.236	4.407

*Values are centered by the mean and scaled by the standard deviation.

x = (mass loss (%) – μ_m) / σ_m where μ_m = 19% and σ_m = 10.6%, y = (frequency (Hz) – μ_{freq}) / σ_{freq}. Refer to the right three columns for valid frequency ranges, μ_{freq}, and σ_{freq} values.

Figura 2. 10 Coeficientes para los diversos ajustes polinomiales para las velocidades correspondientes, en función de la frecuencia y el porcentaje de pérdida de masa para las nueve direcciones medidas diferentes. (Mc Govern, 2011)

Principal Material Direction	Polarization	Attenuation* (Np/cm)						R ²
		α (x,y) = A _α + B _α x + C _α y + D _α x ² + E _α x·y + F _α y ²						
		A _α	B _α	C _α	D _α	E _α	F _α	
Longitudinal	Longitudinal (LL)	0.47520	0.18150	0.03894	-0.00216	0.01100	-0.01073	0.91
	Radial (LR)	0.92810	0.23300	0.01181	0.05916	0.01587	-0.01518	0.93
	Tangential (LT)	0.91880	0.20950	0.01427	0.06587	0.01156	-0.01178	0.91
Radial	Radial (RR)	1.3140	0.58500	0.03310	0.08002	0.01824	-0.05153	0.91
	Longitudinal (RL)	1.7240	0.62090	0.14220	0.09454	0.08593	-0.06128	0.83
	Tangential (RT)	2.0120	0.87400	0.14430	0.22220	0.05147	-0.06407	0.93
Tangential	Tangential (TT)	1.2220	0.40510	0.11190	0.08212	0.03169	-0.03605	0.96
	Longitudinal (TL)	1.7660	0.41630	0.16340	0.04214	0.06075	0.06307	0.90
	Radial (TR)	1.8650	0.45820	0.14510	0.15900	0.02662	-0.08158	0.95

Figura 2. 11 Coeficientes para los diversos ajustes polinomiales para las atenuaciones correspondientes, en función de la frecuencia y el porcentaje de pérdida de masa para las nueve direcciones medidas diferentes. (Mc Govern, 2011)

Se observó que la velocidad aumenta con el aumento de la frecuencia y disminuye con el aumento de la cantidad de deterioro, mientras que la atenuación aumenta con el aumento de la frecuencia y la descomposición (McGovern, 2011).

2.4. Origen del material.

El material empleado para este trabajo de investigación proviene de uno de los edificios más importantes en la historia de México, el Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos. Es un recinto museográfico ubicado en Morelia, Michoacán, que ocuparon tanto el líder insurgente como su familia y descendientes hasta 1910. Se encuentra en el Centro Histórico de Morelia, ubica en la Avenida Morelos, (ver figura 2.12).



Figura 2. 12 (A)Vista del patio del Museo (B) Vista exterior del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.

El inmueble es uno de los monumentos históricos más importantes de la ciudad y del país, puesto que perteneció a uno de los héroes más ilustres de la Historia de México, como lo es Don José María Morelos y Pavón. La casa fue declarada Monumento Nacional en el año 1934 por la Dirección de Monumentos Coloniales y de la República, (ver figura 2.13) (Morelos, 2016).



Figura 2. 13 (A). Vista del pasillo del Museo, (B) Vista interior del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.

En 1910, la situación de la casa de Morelos volvió a modificarse, fue vendida al gobierno mexicano por el nieto del insurgente, Francisco Díaz. Dentro del marco de la celebración del centenario del inicio de la lucha por independencia mexicana, el presidente Porfirio Díaz determinó la adquisición del inmueble y la formación de un museo en honor al insurgente michoacano, (ver figura 2.13)



Figura 2. 14 (A) Carretas de madera que forman parte de la exhibición del Museo, (B)Vista de la vigería exterior del primer piso del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.

Al conmemorarse el centenario de la consumación de la independencia en 1921, se formó una Junta Patriótica para organizar los festejos y armar una exposición de objetos relacionados con otros personajes insurgentes. Hasta 1949 la familia se hizo cargo de la casa.

Este periodo administrativo fue muy importante en la historia de la Casa de Morelos, ya que durante el mismo se depositó el Archivo del Antiguo Obispado, específicamente en 1932. Y se realizó una restauración al inmueble para recuperar su aspecto original, el cual podemos apreciar hasta hoy en día, (ver figura 2.15) (Morelos, s.f.).



Figura 2. 15 (A) Vista de una de las salas de exhibición del Museo, (B) Vista de una de las puertas del Museo y Archivo Histórico Casa de Morelos.

En 1933 fue declarada monumento nacional y en 1939 pasó a resguardo del Instituto Nacional de Antropología e Historia. Con motivo del Bicentenario de la Independencia Nacional, la Casa de Morelos fue restaurada en su totalidad, se renovó la museografía y equipó el Archivo Histórico de un nuevo Sistema de Almacenaje. (Lista, 2011)

Las vigas de mi investigación fueron retiradas del entrepiso del inmueble en esta última remodelación. Debido a las condiciones de degradación y fracturas que estas presentaban, fue necesario su sustitución. Las nuevas vigas que se colocaron en el edificio se trataron con la finalidad de preservarlas.

2.4.1. Descripción del inmueble.

Consta de 9 salas y dos ambientaciones, en la planta baja se ubican 4 salas en las cuales se abordan los temas del origen de la ciudad de Valladolid y la vida en la ciudad en el siglo XVIII, además de la historia de la Casa, la biografía de Don José María Morelos y su vida sacerdotal, (ver figura 2.16).



Figura 2. 16 . (A) Vista del área de servicio del Museo, (B) Vista de la escalera del Museo y Archivo Histórico

2.4.1.1. Casa de Morelos.

En la segunda planta se aborda el periodo insurgente, desde la crisis política de 1808, la incorporación de Morelos a la lucha armada, y hasta su fusilamiento el día 22 de diciembre de 1815. Se aborda también la arquitectura a través de un par de obras pictóricas que nos muestran el Templo y Colegio de Las Rosas, que data de 1876, de Mariano de Jesús Torres, y un Paisaje de Morelia hacia el Siglo XX. Ambas obras forman parte del acervo del Museo Regional de Michoacán (Morelos, s.f.).

El Archivo Histórico Casa de Morelos resguarda más de 2 millones de documentos generados por la administración eclesiástica del antiguo obispado de Michoacán, los cuales van de los siglos XVII al XX, mismos que están organizados en tres fondos: Diocesano, Cabildo y Parroquial. Además, se cuenta con un fondo civil que contiene documentos del gobierno del Estado de Michoacán correspondientes a los siglos XIX y XX. (ver figura 2.17) (INAH, 2016).

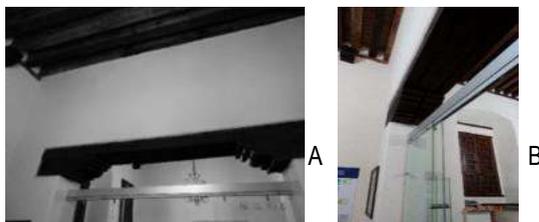


Figura 2. 17 (A) Vista interior del área de consulta del Museo, (B) Vista interior del área de consulta y de resguardo del y Archivo Histórico Casa de Morelos.

Entre los documentos que resguarda el Archivo se encuentra un plano que nos brinda la ubicación de la sala, recámaras y las accesorias, entre otros espacios. Hay documentos de la fachada y del interior de la vivienda, un poder de venta de la casa al Gobierno Federal y un registro de pagos mensuales de los inquilinos de Teresa Cervantes (INAH, 2016).

3 Estado del Arte

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. Su nombre deriva de los términos griegos Xylos (madera) y Logos (estudio), en íntima asociación con el término Xilema propuesto por Naegeli en 1958 para definir al tejido principal de sustentación y conducción del tallo o tronco (Rodríguez, 1977).

La madera es un tejido exclusivo de los vegetales leñosos, que como tales tienen diferenciados y especializados sus tejidos. Estos están formados por células que se pueden asemejar a tubos huecos, en el que la pared del tubo se correspondería con la pared celular y el interior hueco con el lumen de la célula.

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 celular (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.
- Latifoleas: especies leñosas pertenecientes a la división de las angiospermas dicotiledóneas (Robles, Haya, Olmo, Encina, etc.). A veces se subdividen en latifoleadas 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).

3.1 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 (microesporófilas) (Martines, 1948).

Rodríguez (1998) nos dice que en este 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 el de las plantas con flor (División: Angiospermas), su valor económico las convierte en un grupo muy conocido e importante. México cuenta con poco más de 91 especies conocidas de las 575 coníferas que existen en el mundo y pertenecen a cinco familias: Cipreses (*Cupressaceae* 32 especies), Pinos, Abetos y Hayarines (*Pinaceae* 54 especies), Podocarpos (*Podocarpaceae* 3 especies), Ahuehuete (*Taxodiaceae* 1 especies) y el Tejo (*Taxaceae* 1 especies) (Biodiversidad, 2017).

En particular los pinos se pueden encontrar en casi todos los Estados de la República Mexicana, a excepción de Tabasco, Campeche y Yucatán (Instituto de Investigaciones , 1995).

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

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).

Los representantes de este grupo son en su mayoría árboles, aunque a veces pueden adoptar la forma de arbustos dependiendo de las condiciones del hábitat (ver figura 3.1) Las características que los relacionan son:



Figura 3. 1. Ejemplos de las características de las coníferas (Biodiversidad.gob.mx, 2017).

- Flores reducidas a sacos polínicos y óvulos, arreglados usualmente en conos.
- El polen germina directamente en las paredes del óvulo.

- Carecen de vasos y en su lugar tienen células alargadas denominadas traqueidas.
- El saco embrionario es de cuatro células.
- La fertilización es simple (el vehículo es el aire).
- Las gimnospermas son plantas leñosas de crecimiento lento y muy longevas. A este grupo pertenecen las especies más longevas con individuos de más de 4,000 años y las más altas como las secuías de California.
- La mayoría tiene ramificación con un solo eje principal y el tejido de crecimiento se ubica en la punta del árbol.
- El tallo tiene sistema vascular bien definido y la formación de anillos anuales de crecimiento que son un indicador de la edad.
- La mayoría de las especies tiene hojas pequeñas con superficies estrechos y reducidos. Los pinos en particular tienen hojas en forma de agujas que crecen en fascículos colocados en espiral y algunas veces están protegidas por brácteas. Los cipreses tienen hojas escamosas y las hojas de los ahuehetes y oyameles son laminillas angostas y pequeñas.
- La producción de resina y sustancias aromáticas es muy abundante en los pinos y cipreses ya que el tronco de muchas especies contiene numerosos canales resiníferos.
- La forma de la copa por lo general sigue un patrón triangular, aunque puede variar y en el caso del ahuehete constituye una copa amplia con las ramas hacia abajo. Su follaje es permanente (Biodiversidad, 2017).

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

A nivel local algunas especies se utilizan para cosechar sus semillas que son comestibles, o con fines ornamentales e incluso medicinales. De manera general, de las coníferas se obtienen productos forestales como madera, pulpa para elaboración de papel, productos químicos como resinas, barnices, trementinas, etcétera. También son empleadas como plantas ornamentales en parques y jardines particularmente en el caso de cipreses y ahuehetes. Los pinos revisten gran importancia debido a que prácticamente todas las especies de pino son utilizadas para elaborar maderas aserradas (Biodiversidad, 2017).

3.2 Características Anatómicas de la madera

La madera posee tres tipos de tejidos: tejido vascular (de conducción), tejido parenquimático (de almacenamiento) y tejido fibroso (de resistencia). 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).

3.2.1 Tejido Parenquimático Tejido Vascular 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) .

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).

3.2.1.1 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 3.2) (Agriculture, 2010).

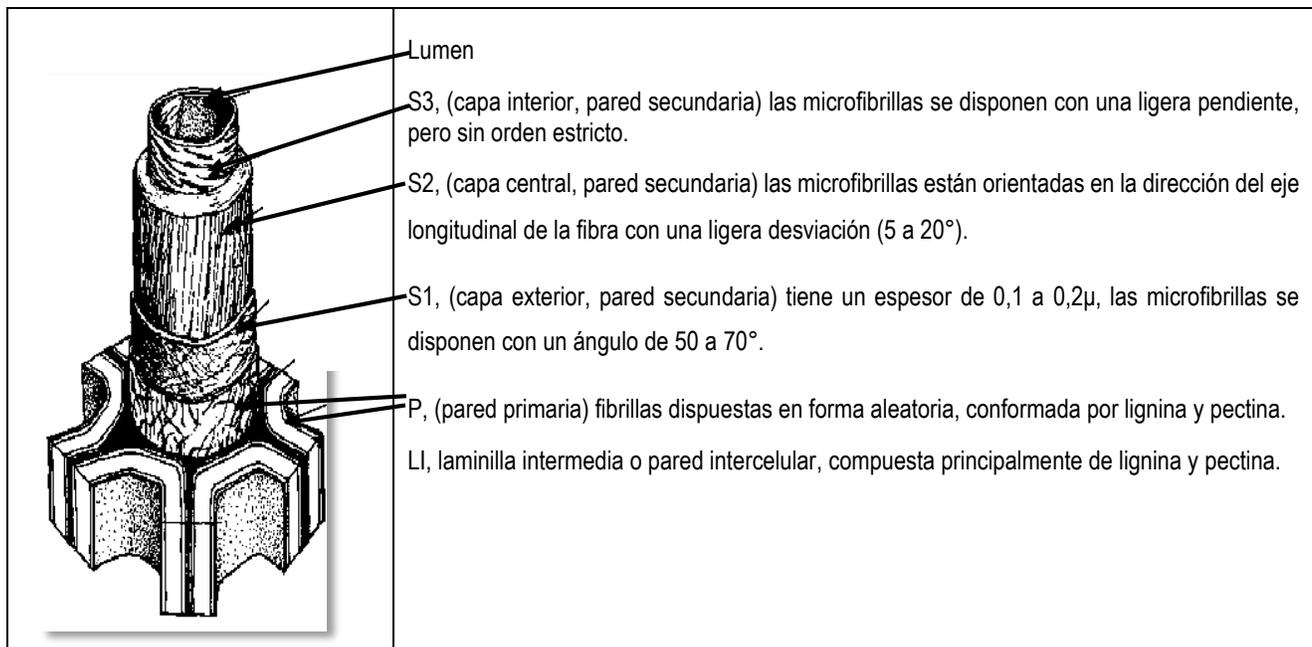


Figura 3. 2 Capas que conforman las paredes celulares en la madera (Agriculture, 2010).

3.2.1.2 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). Los canales resiníferos son cavidades longitudinales dentro del tejido, presentes en la mayoría de las coníferas. Estructura microscópica de las coníferas, (Ver figura 3.3) (Esteban, 1988).

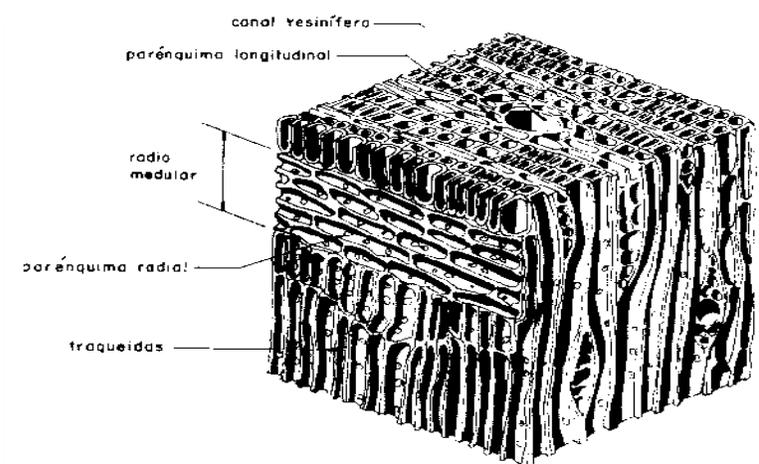


Figura 3. 3 Estructuras celulares de madera de coníferas, (Esteban, 1988)

3.2.2. 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 (abetos, piceas, alerces, cedros, pinos, etc.), que comprende la mayor parte de las incluidas en la división de las gimnospermas (Esteban, 1988).

Latifoleas: especies leñosas pertenecientes a la división de las angiospermas dicotiledóneas (roble, haya, olmo, encina, etc.). A veces se subdividen en latifoleadas boreales, australes y tropicales. 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 hinchazón y merma en la dirección longitudinal que la madera normal (Fernández, 1991).

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 3.4.:

- 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.

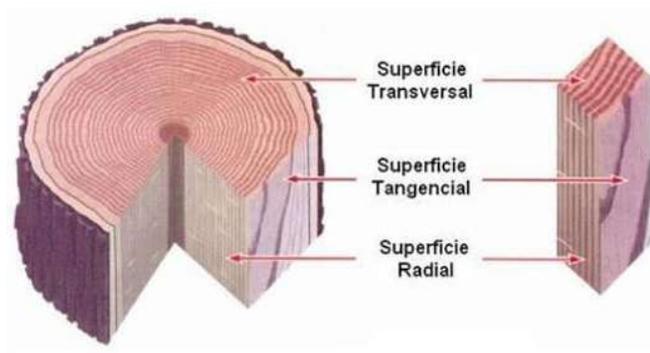


Figura 3. 4 Secciones o planos de la madera (Maderas, 2014)

Al examinar las tres secciones principales en un tronco de madera se pueden observar las siguientes características que son fácilmente diferenciables, ver figura 3.5.:

- Corteza externa o corteza propiamente dicha, constituida por células muertas.
- Corteza interna o liber, área por donde circula la savia descendente.
- Médula, es el centro del árbol por lo regular es un área pequeña y con reducidas características mecánicas.
- Cambium, tejido que produce la madera o xilema hacia el interior y la corteza hacia el exterior.
- Leño o tejido leñoso propiamente dicho, que corresponde básicamente a lo que entendemos por madera (Esteban, 1988)

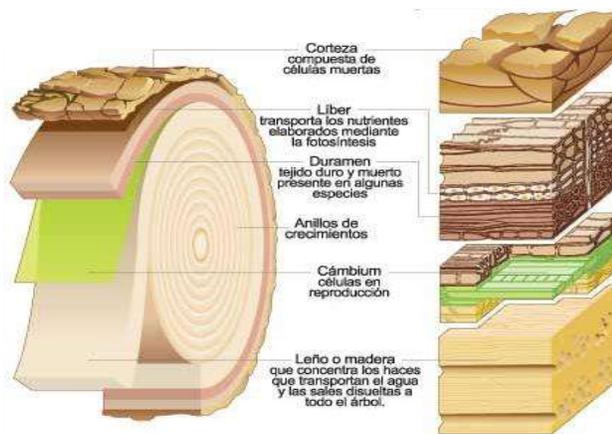


Figura 3. 5 Características de principales de un tronco (Maderas, 2014)

3.2.2.1. 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 (Esteban, 1988).

Cada capa de crecimiento se produce por la interacción del cambium con el ambiente. Por esto se podría decir que es el producto del crecimiento de una estación, pero la diversidad de condiciones ambientales puede inducir más de una capa por año y aún dentro de una misma estación, por lo cual no siempre se puede asegurar que sean anillos anuales. Ver figura 3.6.

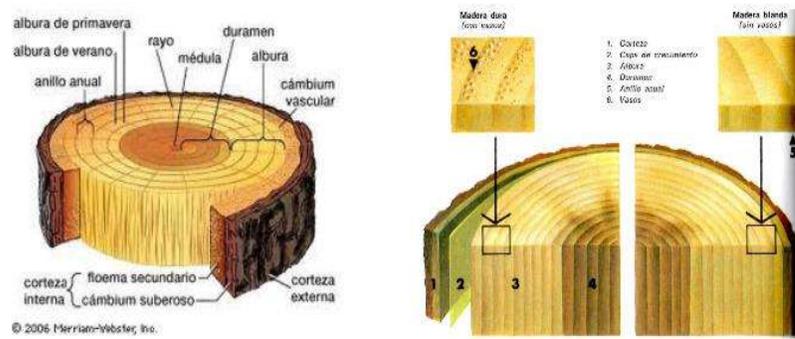


Figura 3. 6 Anillos de crecimiento (forestales, 2010)

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 (Vazquez, 2015).

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 hinchazón y merma en la dirección longitudinal que la madera normal (Fernández, 1991).

3.2.2.2. El grano

se define en función del tamaño de algunos elementos constitutivos de la madera. En las coníferas el grano se refiere al diámetro de las traqueidas, mientras que en las latifoleadas se refiere al de los vasos. El grano se clasifica en las siguientes categorías: basto o grueso, medio y fino. Se entiende por fibra el conjunto de las células dispuestas en la dirección del eje del árbol, descartando los elementos vasculares y las células de parénquima. Las distintas variaciones que puede tener en dimensiones y disposición dan origen a los siguientes tipos de fibra: recta, ondulada, revirada, entrelazada (Kollmann, 1999).

Las células parenquimáticas, limitando el tema al tejido secundario, son células vivas, de forma generalmente poliédrica y capaz de crecer y dividirse. Tienen que ver con el almacenamiento, cicatrización y origen de estructuras adventicias. Las fibras, son células largas, con paredes secundarias engrosadas y lignificadas, que aparecen en cordones y sirven como sostén. Las esclereidas son derivadas de células parenquimáticas esclerosadas y también participan para dar resistencia a los tejidos. Las traqueidas son elementos con doble función: se encargan del transporte de agua y minerales y también del sostén. Son alargadas, con paredes lignificadas, con espesamientos y distintos tipos de puntuaciones según especies (Moreno, 2010).

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. Ver figura 3

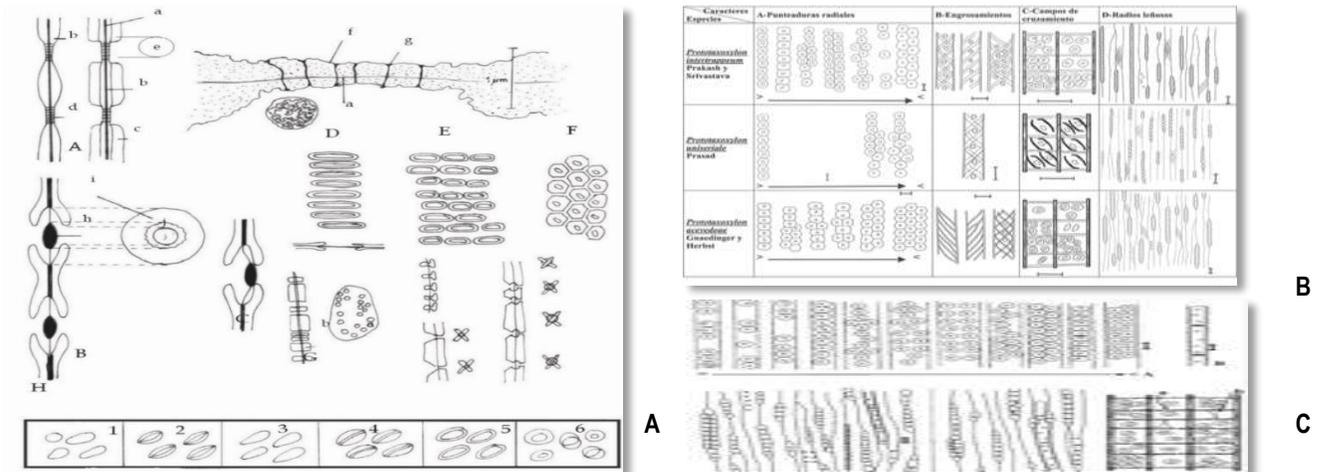


Figura 3. 7 Tipos de puntuaciones: (A) Puntuaciones ; A primarias, B areoleadas: (a) laminilla media, (b) pared primaria, (c) pared secundaria, (d) campo de puntuaciones c/ plasmodesmos, (e) apertura de la puntuación, (f) membrana puntuación, (g) plasmodesmos, (h) torus, (i) imago, (j) apertura C puntuación cerrada; D escalariforme; E opuestas; F alterna, G puntuaciones simples: c/ apertura en forma de ranura; G puntuaciones areoladas con ranura; H tipo de puntuaciones en campo de cruzamiento en coníferas, (Barañaño, 2008). (B) Tabla donde se muestran características de algunas especies argentinas del periodo Jurásico como puntuaciones, engrosamiento de pared celular, campos de cruzamiento y radios leñosos (Herbst, 2017). (C) Tipos de puntuaciones, campos de cruzamiento y rayos leñosos de especies argentinas del periodo Jurásico (Gnaedinger, 2017)

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 (ver figura 3.8). 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 ó más. Se clasifican por esto en epitelios delgados (*Pinus*) o gruesos (Moreno, 2010).



Figura 3. 8 Canal resinífero y elementos que conforman el tejido en coníferas (Barañaño, 2008)

3.3. Definición de Planos o Secciones

En forma previa a cualquier estudio se debe tener bien definido qué cara o superficie se está observando. Para esto es necesario definir cuál es el plano de corte o sección de la muestra que se determinará.

- Si el plano es normal al eje longitudinal del tronco o rama de donde se extrajeron la pieza, 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. No pasa por la médula. Se verá en consecuencia una cara longitudinal tangencial.
- 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 3.9) (Agriculture, 2010)

Cara transversal

- Anillos de crecimiento
- Parénquima longitudinal de pared delgada
- Parénquima longitudinal de pared gruesa
- Células epiteliales
- Traqueidas tempranas
- Par de puntuaduras cortadas a través del torus y aberturas de la pared
- Par de puntuaduras cortadas bajo la abertura de la puntuadura
- Par de puntuaduras tangenciales
- Radios leñosos y/o medulares (parénquima radial)
- Canales resiníferos axiales (en coníferas)
- Madera tardía

Caras longitudinales

Longitudinal tangencial

- Traqueida radial
- Parénquima longitudinal de pared delgada
- Parénquima longitudinal de pared gruesa
- Células de parénquima radial (pared delgada)
- Células epiteliales
- Puntuaciones radiales de traqueidas tardías vistas por el lado del lumen
- Puntuaciones radiales de traqueidas temprana vista por el lado del lumen
- Puntuaciones aeroladas tangencial
- Radios leñosos y/o medulares
- Parénquima longitudinal de pared gruesa
- Canales resiníferos axiales (en coníferas)
- Canales resiníferos radiales
- Células de parénquima radial (pared delgada)
- Células epiteliales radiales
- Puntuaciones aeroladas en la cara tangencial en traqueidas tardías
- Puntuaciones aeroladas en traqueidas tempranas

Longitudinal radial

- Traqueidas en cadena
- Parénquima longitudinal de pared delgada

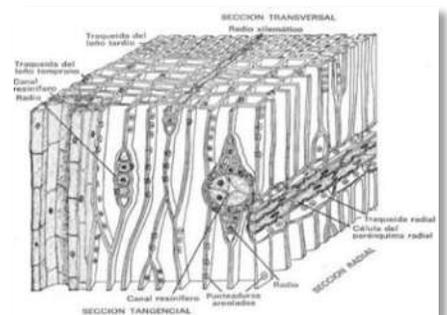


Figura 3. 9 Estructura microscópica de coníferas. (madera, 2011)

3.4 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) (Hoadley, 2000).

La posibilidad de emitir partículas gaseosas (olor). Con el agua (contenido de humedad, torsión, hinchamiento, merma). La madera es un tejido exclusivo de los vegetales leñosos, que como tales tienen diferenciados y especializados sus tejidos. Estos están formados por células que se pueden asemejar a tubos huecos, en el que la pared del tubo se correspondería con la pared celular y el interior hueco con el lumen de la célula (Agriculture, 2010).

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 celular (Fernández, 1991).

3.4.1 Material Anisotrópico.

La madera no es una materia de estructura homogénea y uniforme. Se encuentra formada por un conjunto de células alargadas de diferente longitud que cumplen funciones tales como la conducción de la savia (alimento del árbol), transformación y almacenamiento de sustancias nutrientes o bien la sustentación física (ver figura 3.10) (Hoadley, 2000).

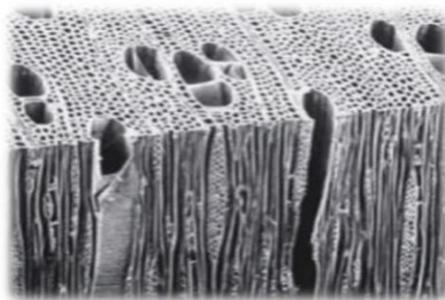


Figura 3. 10 Fotografía de un conjunto de células de Madera (Hoadley, 2000)

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) .

3.4.2. Materiales ortotrópicos

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, ver Figura 3.11 (Kollmann, 1999),

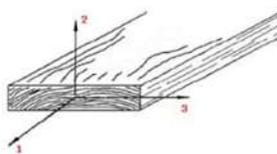


Figura 3. 11 El eje longitudinal (1), eje radial (2) y el eje tangencial (3) (Agriculture, 2010)

3.4.2.1 Cortes Planos

Con el fin de ser capaz de mirar a 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 transversal 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).

Por ejemplo, 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 3.12) (Agriculture, 2010)

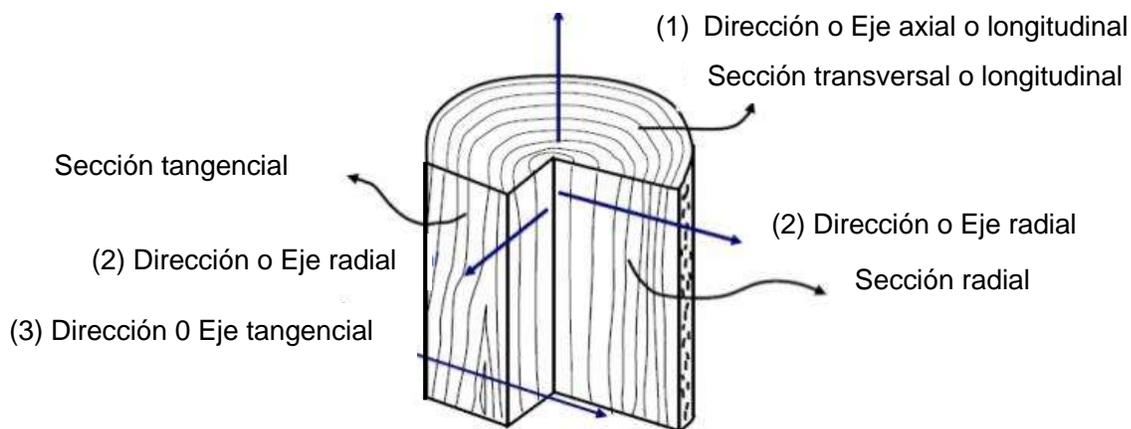


Figura 3. 12 Dirección o eje longitudinal (1), dirección o eje radial (2) y dirección o eje tangencial (3) (Javiersv, 2013)

3.4.3. Higroscopicidad

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

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

3.4.4. Contenido de Humedad.

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

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

Ecuación 1. Contenido de Humedad

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

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

$$v = \frac{m}{p}$$

Ecuación 2. Obtención de volumen

$$m = p * v$$

Ecuación 3. Obtención de la masa.

3.4.5. Densidad

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). En la figura 3.14 se muestran ejemplos de comose puede medir la densidad de distintos cuerpos.



Figura 3. 13 Ejemplos de obtención de densidad (García, 2012)

$$P = \frac{m}{v}$$

Ecuación 4. Obtención de densidad

3.4.6. 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. (ver figura 3.15) (Kollmann, 1999) .



Figura 3. 14 Esquema de ensayo de dureza (puede medirse en forma normal o paralela a la fibra) (Salas, 2013)

3.4.7. Propiedades Térmicas

Los coeficientes de dilatación de la madera son muy bajos por lo que se puede decir que apenas se dilata. Así mismo la madera es un mal conductor del calor debido a la escasez de electrones libres. Una vez que la madera entra en combustión hay que tener en cuenta la formación de carbón en las capas externas, que retrasa la difusión del calor hacia su interior constituyendo una barrera térmica que actúa como aislante. (ver figura 3.16) (Agriculture, 2010).



Figura 3. 15 Combustión de Madera (pxhere, 2017)

3.4.8. Propiedades Acústicas

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, ver figura 3.17 (Kollmann, 1999).



Figura 3. 16 Soporte para iPad RH Gramófono: Amplificador de madera de roble pasivo (Hardware, 2012)

Por el contrario, las placas acústicas porosas fabricadas con fibras de madera pueden absorber más del 90% del sonido y reflejar el resto. Los paneles de tableros contrachapados pueden utilizarse como paneles resonantes, diseñados para absorber sonidos de baja frecuencia, que se colocan separados de la superficie rígida unos centímetros (Fernández, 1991).

3.4.9. Transmisión del sonido.

La pérdida de transmisión se rige por la ley de masas, cuanto mayor sea la masa por unidad de superficie la transmisión será menor. Esta ley indica que la madera, de forma aislada no es un buen aislante acústico; pero si las paredes o suelo constan de dos o más elementos de madera y se incorporaran otros productos con mejores propiedades acústicas, de tal forma que queden sin contacto entre sí (rotura de los puentes acústicos), se consigue un buen nivel de aislamiento (Agriculture, 2010).

Los mejores resultados se consiguen con suelos pesados y no resonantes, en ambos casos la madera está en desventaja. Pero al igual que en el caso de transmisión una posible solución se centraría en el diseño y composición de estos elementos (Kollmann, 1999).

3.5 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.
- 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:

3.5.1. Médula incluida.

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, ver figura 3.18 (Ceron, 1999).



Figura 3. 17 Ilustración de ejemplo de Médula Incluida (Agriculture, 2010)

3.5.2. Bandas anchas de parénquima

Son zonas conformadas por células de parénquima, distribuidas en bandas continuas de variado espesor. Dichas células sirven para almacenar sustancias de reserva, razón por la cual son susceptibles al ataque de hongos e insectos cuando la madera presenta un alto contenido de humedad. No se debe permitir su presencia en piezas que van a estar sometidas a esfuerzos de compresión.

Al observar la sección transversal de una pieza se les reconoce porque son de color más claro que la parte fibrosa del leño, además se distribuyen en bandas concéntricas, figura 3.19. Para una mejor identificación conviene humedecer la sección transversal del elemento de madera (Estructural, 1984).

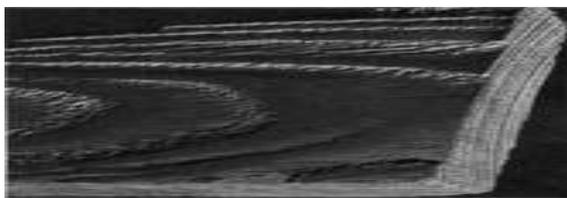


Figura 3. 18 Fotografía donde se muestran las bandas anchas de parénquima (Echenique, 1993)

3.5.3. Grano, 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.

En el árbol, las especies presentan distintas configuraciones del grano que, al obtener la pieza aserrada, se manifiestan como: grano recto, inclinado y entrecruzado. Las dos últimas se consideran defectos (Agriculture, 2010).

3.5.3.1. Grano inclinado

Es la desviación angular que presenta el grano con respecto al eje longitudinal de la pieza de madera. Por lo general es constante a todo lo largo de la pieza. Esta inclinación aparece porque, al aserrar la madera, el eje de la pieza forma un ángulo con la orientación de las fibras (Echenique, 1993).

Otra causa del grano inclinado se debe a la presencia de un nudo, que altera la dirección de las fibras del tronco a su alrededor. En este caso la inclinación del grano no es general sino localizada. En la figura 3.18 se muestran piezas de madera con las fibras inclinadas con respecto a los cantos. En el detalle (A) se aprecia la desviación del grano en una cara, en el detalle (B) la desviación se da en el canto, mientras que en el detalle (C) ocurre en ambos planos (Echenique, 1993).

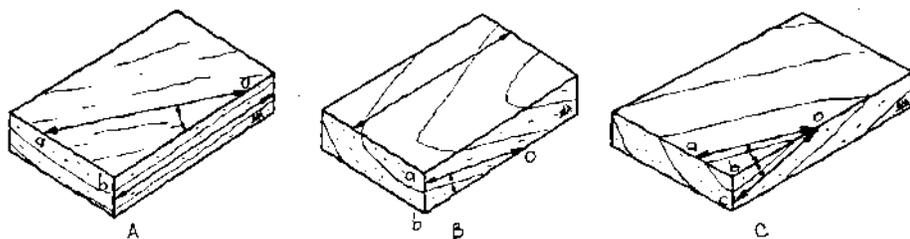


Figura 3. 19 Desviación del Grano (A) y (B) en un Plano, (C) en dos Planos (Agriculture, 2010)

3.5.3.2. 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, es decir, en las caras de la figura 10 -(C) 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% (ver figura 3.21) (Echenique, 1993).

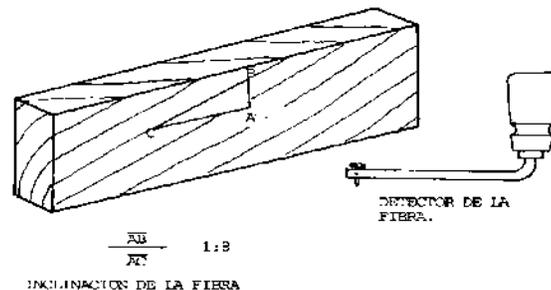


Figura 3. 20 Medición de la Inclinación del Grano (Agriculture, 2010)

3.5.4. 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, 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 de la xilema (figura 3.21-(A)) (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 (figura 3.22 (B) y (C)) (Echenique, 1993).

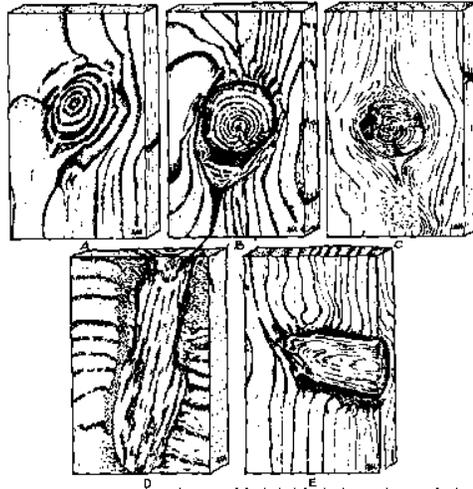


Figura 3. 21 Esquema de los Principales Tipos de Nudos en la Madera;(A) Nudo fijo, (B) y (C) Nudo flojo, (D) Nudo en forma de perno, (E) Nudo en forma de perno mostrando la porción fija y la floja (Agriculture, 2010)

- **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 (figura 3.23) (Hoadley, 2000).

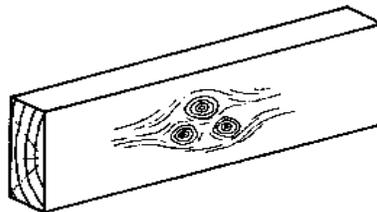


Figura 3. 22 Nudos arracimados. (Agriculture, 2010)

- 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. En la figura 3.24 se ilustran diversas formas en que los nudos pueden aparecer sobre superficies aserradas (Echenique, 1993).

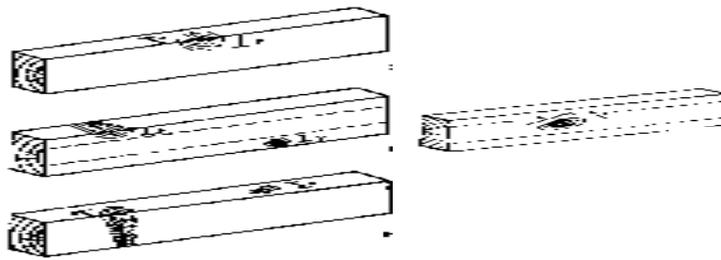


Figura 3. 23 Nudos arracimados o en racimo (Agriculture, 2010)

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).

3.5.5. Bolsas de resina

Son cavidades entre los estratos de que se componen los anillos de crecimiento. Sus efectos sobre la resistencia mecánica dependen de su abundancia, tamaño y localización en las piezas de madera (figura 14). Ya que representan una discontinuidad real de la madera, su principal efecto es la disminución del área sujeta a esfuerzos, en corte paralelo y tensión perpendicular a las fibras. Con frecuencia, presentan una desviación local en la dirección de las fibras en el lado convexo de la bolsa que debilita un poco la resistencia de la pieza en compresión y tensión paralela a las fibras. Por esto las bolsas de resina cerca o en el plano neutro de piezas de madera sujetas a flexión, tienden a reducir el área disponible para resistir las fuerzas cortantes horizontales, ver figura 3.25 (Echenique, 1993; Ceron, 1999).

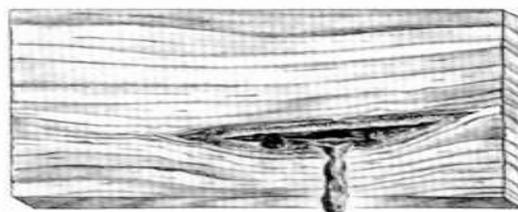


Figura 3. 24 Bolsa de resina (Agriculture, 2010)

3.6. Degradación de la madera

La madera como material de origen biológico tiene la propiedad de ser biodegradable, y por tanto, la degradación de la madera conlleva la modificación de sus propiedades mecánicas. Los agentes que modifican las características de la madera pueden ser organismos vivos como hongos e 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.

3.6.1. Patologías de la madera

Los principales agentes degradadores de la madera son los hongos e 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 (McGovern, 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.
- **Temperatura**: 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). Los daños que producen son principalmente estéticos, no estructurales (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 son la plaga más peligrosa de la madera, pues son insectos sociales que atacan masivamente la madera y pueden ocasionar su completa degradación. Los ataques de termitas son producidos por obreras adultas. Viven en termiteros en el interior del suelo, normalmente a 4-5 m de profundidad. Las termitas salen de los termiteros para dirigirse a la zona donde existe madera para alimentarse, para ello construyen galerías por el interior del suelo, que en algunos casos llegan a tener un centenar de metros (a veces con termiteros intermedios). Sin salir nunca la exterior, son capaces de introducirse en los edificios, practicando galerías exteriores a base de fabricar una argamasa con mezcla de tierra y excrementos (Tovar, 1995).

3.7 Propiedades Mecánicas de la Madera.

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 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).

3.7.1. Resistencia a la flexión.

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.

El comportamiento a la flexión es una combinación del comportamiento a compresión y a tracción para la madera. Valores característicos de diseño 70- 340 kg/cm² (Kollmann, 1999; Ambrose, 1998).

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 3.26) (Giuliano, 2009).

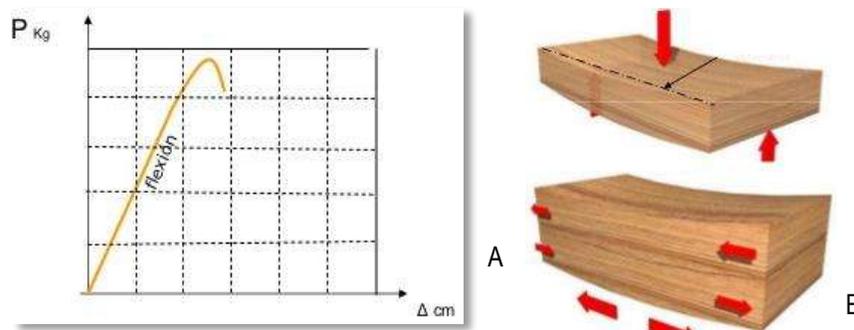


Figura 3. 25 (A)Relación tensión – deformación de una conífera libre de defectos a flexión (Giuliano, 2009), (B) Diagrama de resistencia a la flexión en madera. (Salas, 2013)

3.7.2. 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. (Kollmann, 1999). 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 (Ambrose, 1998).

En madera libre de defectos la relación 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 3.27).

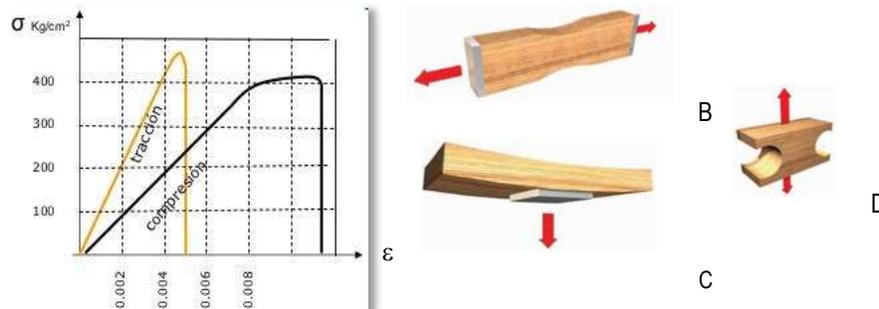


Figura 3. 26 (A) Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos a tracción y compresión. (Giuliano, 2009), (B) Diagrama ensayo de tracción paralelo a las fibras, (C) ensayo de tracción normal a las fibras, (D) ensayo de tracción normal radial a las fibras. (Salas, 2013)

3.7.3. Resistencia a la compresión

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 (Kollmann, 1999).

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 2.28) (Ambrose, 1998) (Giuliano, 2009).

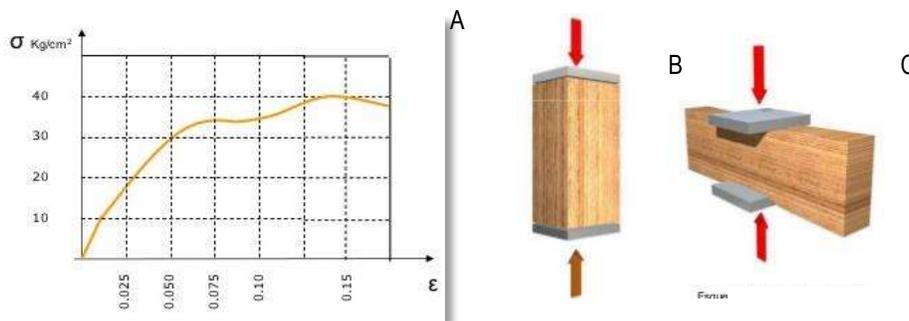


Figura 5. 27 (A) Relación tensión-deformación a compresión perpendicular. (Giuliano, 2009), (B) Esquema de ensayo de compresión paralela a las fibras, (C) esquema de ensayo de compresión normal a las fibras. (Salas, 2013)

3.7.4. Módulo de Young o Módulo de elasticidad longitudinal

Es un parametro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Muchos materiales sólidos, incluyendo los resorte 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. (Kollmann, 1999; Ambrose, 1998). La figura 3.29 muestra el diagrama de esfuerzo de deformación.

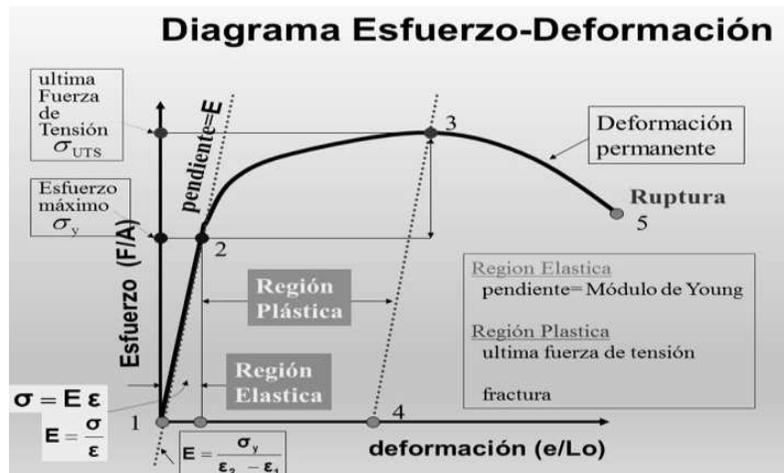


Figura 3. 28 Diagrama de Esfuerzo-de formación Deformación (e/Lo), Fuerza de Tensión pendiente = E, última fuerza de tensión fractura, Esfuerzo (F/A), (1 a 2) Región Elástica, (2 a 3) Región Plástica, (5) Ruptura última, ,(1 a 2) Región Elástica pendiente = Módulo de Young, (2 a 3) Región Plástica (3 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 pascuales (Pa) kg/s² m (Giuliano, 2009).

$$\frac{M}{LT^2} = \left(\frac{\text{masa}}{\text{longitud} \cdot \text{tiempo}^2} \right)$$

Ecuación 2. Dimensiones del Módulo de Young.

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

Ecuación 3. Módulo de Young.

El módulo de elasticidad más usado es el paralelo a las fibras, sin embargo este es diferente ya se trate de sollicitaciones de compresión o de tracción. Para materiales cuya longitud es mucho mayor que el ancho o espesor, se tiene precaución por el Módulo longitudinalde elasticidad.

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 3.30)

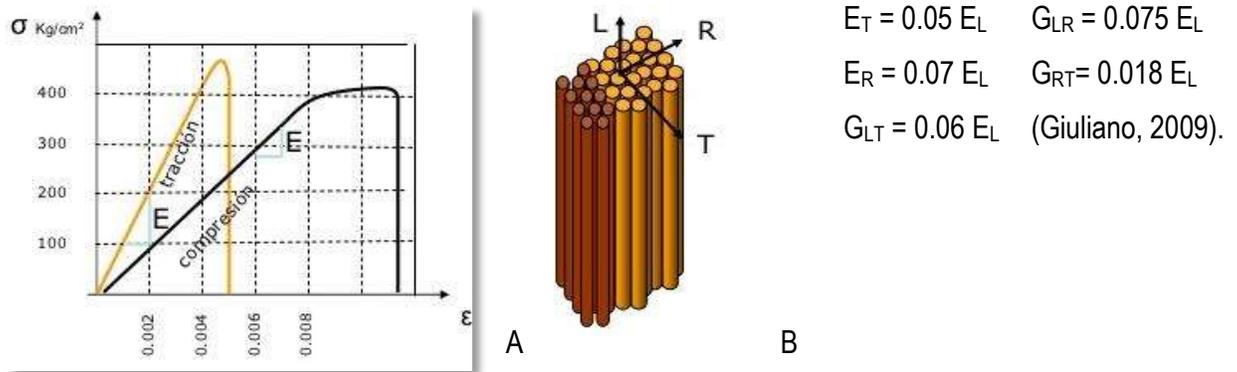


Figura 3. 29 (A) Relación tensión-deformación de una conífera libre de defectos atracción y compresión. (Giuliano, 2009), (B) Esquema de las fibras de la madera en sus ejes principales.

3.7.5. 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:

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 3.31 y someterlo a una fuerza cortante, para pequeñas deformaciones se puede calcular la razón entre la tensión y la deformación angular (Ambrose, 1998)

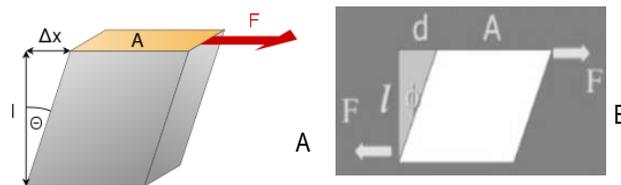


Figura 3. 30 (A) cubo someterlo a una fuerza cortante, (B) diagrama del esfuerzo cortante. (Ambrose, 1998)

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

Ecuación 4. Módulo de Corte S o Tensión cortante

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

Ecuación 5. 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 .

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

Ecuación 6. 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 3. 32 A)
- Tensión tangencial de deslizamiento, la falla se produce por deslizamiento de unas fibras con respecto a otras en dirección longitudinal. (ver figura 3. 32 B)
- Tensiones tangenciales de rodadura, la falla se produce por rodadura de unas fibras con respecto a otras. (ver figura 3. 32 C)

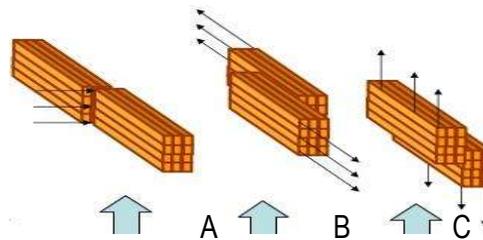


Figura 3. 31 (A) Tensión tangencial de cortadura, (B) Tensión tangencial de deslizamiento Y (C) Tensiones tangenciales de rodadura. (construcciones, 2016)

3. 8. Vigas.

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 3.33) (Ambrose, 2002).

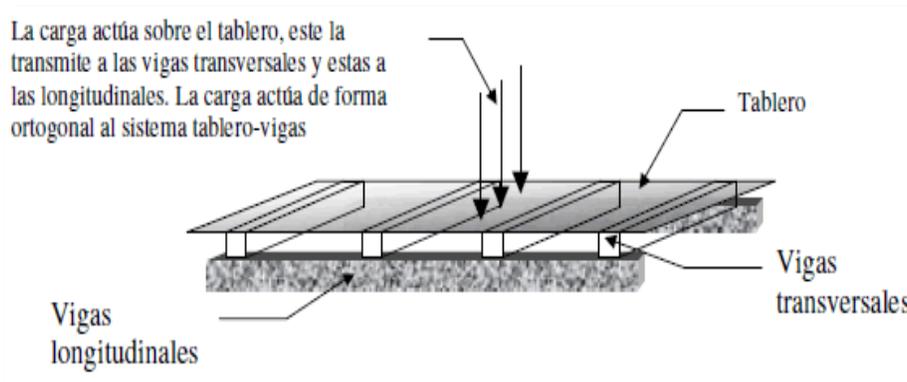


Figura 3. 32 Entramado de vigas trasversales y longitudinales en un puente de vigas.

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 3.34) (Ambrose, 2002)

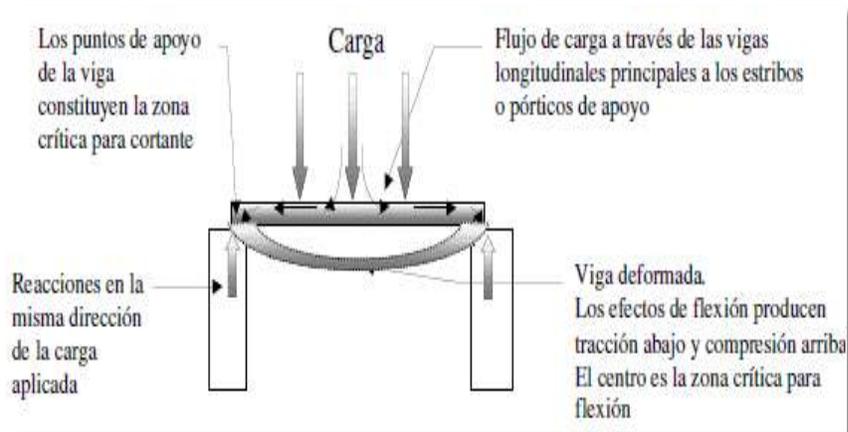


Figura 3. 33 Forma de trabajo de un puente con vigas.

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 3.35

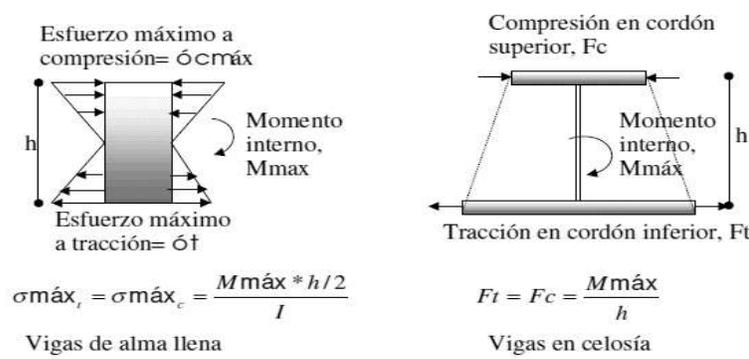


Figura 3. 34 Distribución de esfuerzos por flexión. (Duque, 2004)

Las vigas se pueden construir de alma llena (compacta). En la 3.36 se muestra la distribución de esfuerzos internos según la composición de la viga (Duque, 2004).

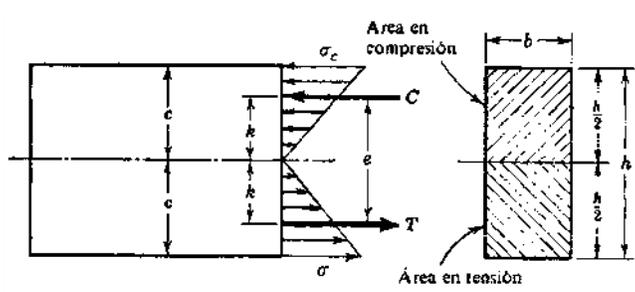


Figura 3. 35 Distribución de esfuerzos internos según la composición de una viga. (Duque, 2004)

3.9. 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).

3.9.1. 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).

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).

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 carcoma (COFAN, 1999).

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

- Por impregnación química superficial (líquidos y gel).
- Inyección química en exteriores, muros, suelos y vigas.
- Tratamientos biológicos (cebos).

Los productos utilizados para los métodos de impregnación e inyección se denominan de tipo orgánico. Se llaman así porque contienen disolventes derivados del petróleo para la solubilización de las sustancias activas de síntesis (permetrina, lindano); se fijan por resinas y son productos bastante estables y penetrantes en la madera.

Estos productos previenen y acaban con los individuos de los insectos y hongos xilófagos, ya que impregnan la madera con biocidas y así provocan la muerte de aquéllos cuando la digieren (Johnston, 1983).

Sin embargo, para 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. Estos tratamientos se desarrollaron a finales del siglo XX, se llaman tratamientos biológicos o cebos y principalmente 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, s.f.).

Éstos se colocan en zonas donde existen puntos activos de ataque de las termitas. Se monitorizan periódicamente y si se encuentran termitas se sustituye la celulosa pura por el cebo impregnado con el producto, que, tras ser consumido y repartido lentamente por toda la colonia, incluida la reina, hace que en el proceso de muda mueran los individuos, lo que termina por exterminar a la colonia.

3.11 Los Inicios de la detección de ondas de alta frecuencia acústica

Antes de la edad de la electroacústica la detección de ondas de alta frecuencia acústica fue difícil. John Tyndall observó los efectos de las ondas de sonido sobre las flamas de gas y esto desarrolló la “Flama Sensible” como un método de detección. El famoso físico acústico Lord Rayleigh hizo muchas contribuciones tempranas al campo del Ultrasonido, incluyendo el desarrollo del disco Rayleigh usado para medir la presión acústica. La bien conocida Onda superficial u Onda Rayleigh, la cual juega un papel importante en las pruebas ultrasónicas y los componentes de la onda acústica superficial, fue actualmente predicho por Rayleigh desde esfuerzos para analizar el fenómeno sísmico (Krautkramer, 1990).

Mediciones aproximadas de la velocidad del sonido fueron realizadas en 1808. En 1826 fue medida la velocidad del sonido bajo el agua por Colladon y Sturm. George Stokes incluyó los efectos de la viscosidad en la velocidad del sonido derivando una expresión teórica. El físico Soviético Petr Lebedev tuvo éxito explicando el mecanismo de absorción en ondas ultrasónicas. Lebedev fue notable por desarrollar el primer sistema verdadero de ultrasonido (Cartz, s.f.).

Entre las muchas contribuciones de Rayleigh fue el análisis del patrón de la onda de un pistón generador de alta frecuencia, un factor crítico en el entendimiento de los campos de radiación de los modernos transductores ultrasónicos. La edad de oro de la electroacústica fue abierta por el clásico tratado de la electricidad de James Clerk Maxwell y cerrado por el descubrimiento de los hermanos Curie la piezoelectricidad. Durante este periodo el principio de la acústica fue publicado en la teoría del sonido de Rayleigh (Robert. E., s.f.).

Extendiendo el eco para la detección de objetos en el océano fue propuesto por Richardson en 1912. Fessenden diseñó un transductor para una fuente de ondas ultrasónicas de alta frecuencia para señalización submarina y rango del eco, él fue capaz de detectar un iceberg a una distancia de 2 millas en 1914, utilizando para ello una frecuencia de 1000 Hz. Langevin desarrolló una fuente de ondas ultrasónicas usando el efecto piezoeléctrico con cristales de cuarzo entre placas de acero. Langevin fue capaz de detectar ecos desde un submarino a distancias de 1.5 km (Krautkramer, 1990).

Pierce desarrolló el dispositivo de magnetostricción como un oscilador ultrasónico. ASDIC (Allied Submarine Detection Investigation Committee) en la Primera Guerra Mundial y SONAR (Sonic Navigation Ranging) en la Segunda Guerra Mundial son términos usados para describir las técnicas de ecos bajo el agua del rastreo de objetos y mediciones de la profundidad del océano. Behnd en 1921 reportó un método para la medición de la profundidad de la cama del océano por un método de resonancia ultrasónica, usando ondas continuas. Nicholson llevó a cabo estudios de ultrasonido usando el efecto piezoeléctrico (Cartz, s.f.).

En 1929 y 1935, Sokolov discutió el uso de ondas ultrasónicas en la detección de defectos en objetos metálicos, y Mulhauser en 1931 obtuvo una patente usando ondas ultrasónicas para detectar defectos en sólidos, usando un modo operativo de transmisión con dos transductores, uno para transmitir y el otro para recibir las ondas ultrasónicas. Sokolov llevó a cabo varios experimentos abriendo camino a las pruebas ultrasónicas: investigando líquidos acoplantes, impedancias semejantes y desarrollando métodos para obtener la imagen de un defecto por la técnica de escaneo. Schraiber en 1940 desarrolló métodos de pruebas de ondas ultrasónicas continuas, y Erwin reportó en 1945 una medición de espesor por métodos ultrasónicos (Krautkramer, 1990).

Un desarrollo muy importante viene con los estudios de Firestone en 1940 y Simons en 1945 de pruebas de pulso ultrasónico, usando el principio del eco. Firestone diseñó un instrumento, llamado "Reflectoscopio", en el cual un pulso de ondas ultrasónicas fue transmitido dentro del cuerpo que está bajo inspección, y el intervalo del tiempo fue medido por el pulso de regreso la cual es hoy conocida como la técnica de inspección eco-pulso (Cartz, s.f.).

A continuación, se presenta el resumen de uno de los artículos consultados en los que se emplean las técnicas de ultrasonido en madera.

3.12. 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).

En algunas áreas, los campos de alta y baja frecuencia son delimitados tanto por un rango de frecuencia como por un nivel de potencia. Por lo que, las aplicaciones de baja intensidad típicamente involucran frecuencias sobre el orden de MHz. Por lo tanto, la acústica trata con los fenómenos macroscópicos y son formulados como si la materia fuera continua (Chen, 2013).

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).

3.12.1. Ondas Ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas en pruebas no destructivas, se encuentran en el rango de 0.5 a 10 MHz, sin embargo, es más generalizado el criterio aquel de considerar como onda ultrasónica a las ondas con frecuencia superior a 20,000 Hz (Chen, 2013).

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.

3.12.1.1. Tipos de ondas ultrasónicas.

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 transmite, 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:

3.12.1.2. 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 3.37 se muestra un ejemplo de una onda longitudinal (Krautkramer, 1990)

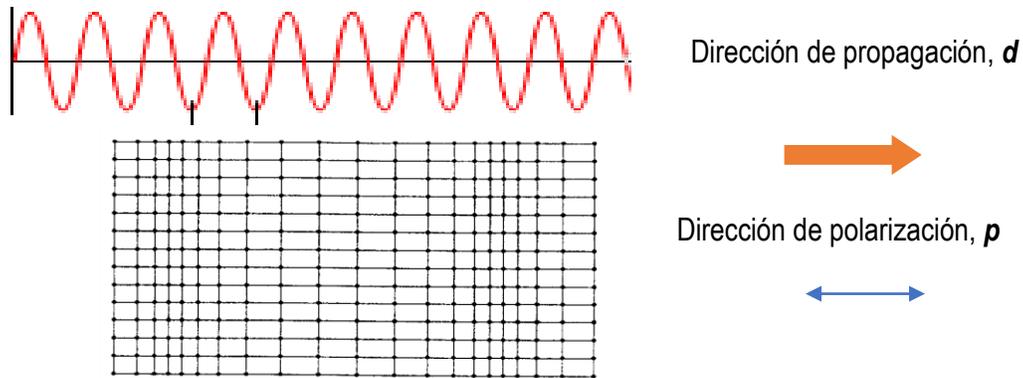


Figura 3. 36 Forma de propagación de la onda longitudinal

3.12.1.3. 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 3.38.

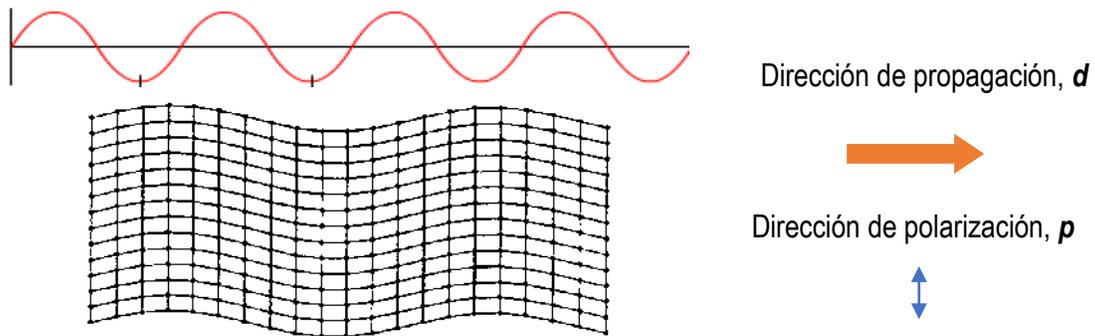


Figura 3. 37 Forma de propagación de las Ondas Transversales

3.12.1.4. Ondas Superficiales (ondas Rayleigh)

Son otro tipo de ondas usadas en la inspección y caracterización de materiales. Estas ondas viajan a lo largo de superficies planas o curvas de partes sólidas relativamente delgadas figura 5. 39. En las ondas superficiales, las oscilaciones de las partículas generalmente siguen una órbita elíptica. El eje mayor de la elipse es perpendicular a la superficie a lo largo de la cual las ondas están viajando. El eje menor es paralelo a la dirección de propagación. (ver figura 3.39) (Nagy, 1999; Chen, 2013; Krautkramer, 1990).

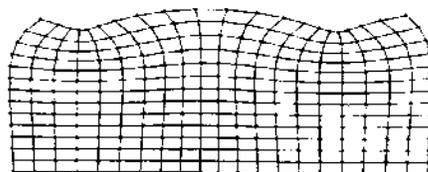


Figura 3. 38 Patrón de vibración producido por una Onda Superficial propagándose en una superficie libre en un medio sólido.

3.12.2. 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 Figuras 3. 22, 3.23 y 3.24. Generalmente, la ecuación general de la onda acústica es representada por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Ecuación 7. 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:

$$C = \sqrt{\frac{\text{rigidez}}{\text{densidad}}}$$

Ecuación 8. Velocidad de fase

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Ecuación 9. Velocidad de las ondas longitudinales

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

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Ecuación 10. 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 formular se anexa la Figura 3. 38 la cual nos muestra las expresiones más frecuentemente usadas en ultrasonido y sus símbolos

SÍMBOLO	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	km/s
v	Velocidad de la partícula	km/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

Figura 3. 39 Unidades, Simbología y Constantes Elásticas de las Ondas Ultrasónicas

3.13. 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 de medio en las que se propague mientras que la atenuación depende de la microestructura y defectos cristalinos. (ultrasound, 2001)

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).

La figura 3.33 muestra un tren de ecos de las múltiples reflexiones de la propagación ida-vuelta del pulso ultrasónico a través de un espécimen. 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:

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

Ecuación 11. Velocidad de propagación en el material

Donde: c = velocidad de propagación en el material

d = distancia de propagación (espesor del espécimen)

Δt = tiempo entre ecos (ida-vuelta) adyacentes

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 3.41) (Matikas, 1996).

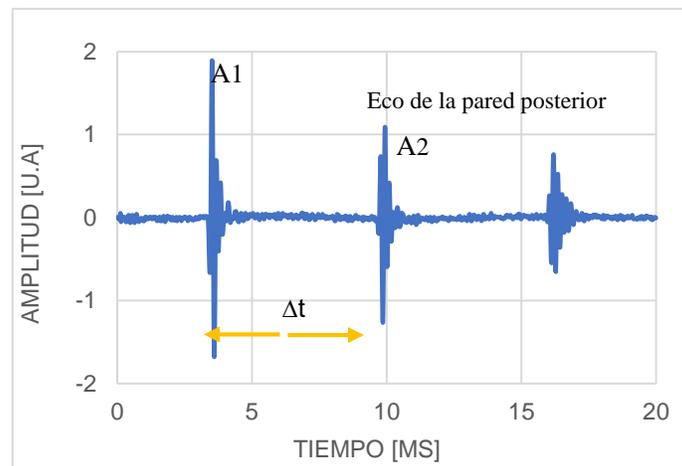


Figura 3. 40 Tren de Ecos recibidos por la pared posterior del espécimen.

3.13.1. Velocidad Ultrasónica y Microestructura.

La velocidad Ultrasónica en muchos sólidos ingenieriles (metales, cerámicos, madera o materiales linealmente elásticos) están directamente relacionados con la densidad y las constantes elásticas (módulo longitudinal, módulo de corte, módulo de Young). Las propiedades elásticas en la madera ya mencionadas pueden depender fuertemente de la porosidad, porcentaje de humedad la dirección de las fibras u otros factores en su estructura (ultrasound, 2001).

3.14. Atenuación Ultrasónica

Las mediciones de atenuación son el pivote para establecer las correlaciones entre la micro estructura 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 (Np) o Decibeles (Db) que están dados por las siguientes ecuaciones respectivamente: (He, 1998).

$$L[\text{Neper}] = \ln \frac{A_1}{A_2} \text{ or } L[\text{dB}] = 20 \log \frac{A_1}{A_2}$$

Ecuación 12. Relación de amplitudes

Donde A_2 y A_1 denotan la amplitud con y sin atenuación, respectivamente.

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).

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 13. 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 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).

De esta manera, la dispersión no solamente reduce la señal coherente además aumenta el ruido del material incoherente lo cual limita la detectabilidad de la señal atenuada. Por lo que la energía dispersada puede ser asumida que sea un mecanismo de pérdida tal como la energía absorbida. (ultrasound, 2001) Generalmente, el coeficiente de atenuación puede ser expresado como la suma de los componentes de la absorción y dispersión:

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

Ecuación 14. Coeficiente de atenuación

La Atenuación Ultrasónica 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).

3.15. Técnicas Ultrasónicas de Inspección.

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:

3.15.1. Técnica Ultrasónica de contacto.

La técnica ultrasónica de contacto tiene el mismo principio de funcionamiento que la técnica ultrasónica 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 3.42 en la cual se representa la técnica Ultrasónica de contacto (Popp, 1990).

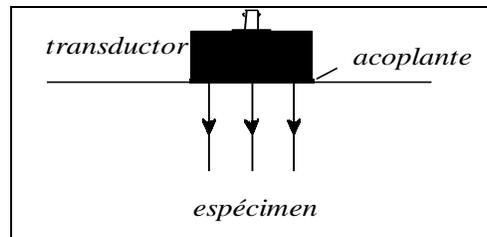


Figura 3. 41 Técnica Ultrasónica de contacto.

3.15.2. Método Eco Pulso.

Es el método de Eco Pulso es uno de los métodos ultrasónicos 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 ultrasónica (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 3.43) (ultrasound, 2001).

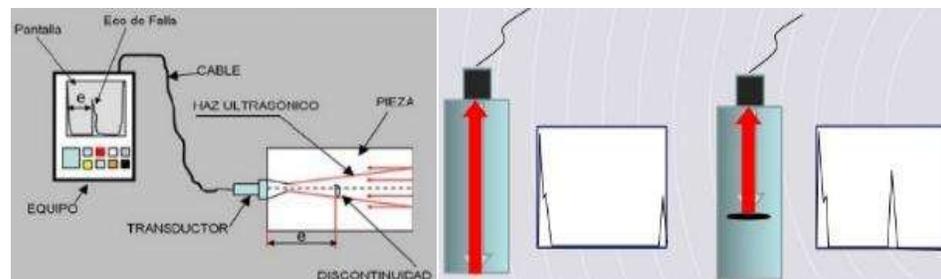


Figura 3. 42 Diagramas del Método de eco pulso.

3.15.3. 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 3.42) (Popp, 1990).



Figura 3. 43 Método de Trasmisión.

3.15.4. 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 3.45 (Katalin Kránitz, 2013).

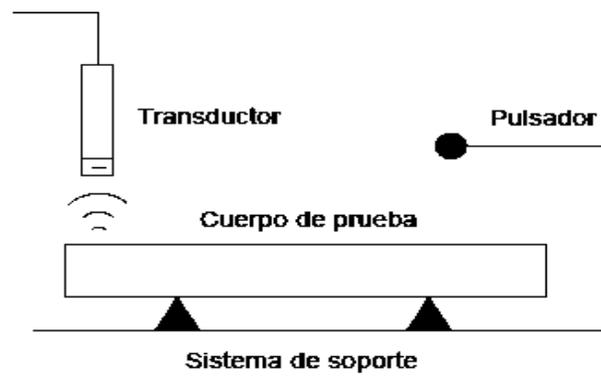


Figura 3. 44 Método de Resonancia.

$$L[\text{Neper}] = \ln \frac{A_1}{A_2} \text{ or } L[\text{dB}] = 20 \log \frac{A_1}{A_2}$$

Ecuación 15. Relación de amplitudes

3.16. 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 (William, 2006).

En contraposición a la microscopía 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 (Alcides, 2009).

Básicamente, un cañón de electrones produce un haz de electrones en una columna al vacío que es dirigido y enfocado sobre un pequeño punto de la muestra. Las bobinas de barrido permiten al haz barrer una pequeña área de la superficie de la muestra. Los electrones con un ángulo pequeño de dispersión interactúan con las protuberancias de la superficie y generan una dispersión de electrones secundarios que producen una señal electrónica que a su vez produce una imagen con una profundidad de campo de aproximadamente unas 300 veces superior a la del microscopio óptico (sobre 10 μm a 10 000 diámetros de aumento) (William, 2006).

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 figuras 3.46, podemos observar el microscopio electrónico de Barrido, 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 (William, 2006).



Figura 3. 45 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 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 (Alcides, 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 (William, 2006).

3.16.1. Preparación De Muestras

La preparación de muestras para un Microscopio Electrónico de Barrido se distingue según el tipo de muestra que se quiere analizar.

Si la muestra es orgánica no conductora, primero se debe limpiar cuidadosamente y luego debe hacerse un recubrimiento metálico mediante la técnica del Sputtering (pulverización catódica) esto para que en la muestra haya desprendimiento de electrones y sean captados en el Microscopio Electrónico de Barrido (Alcides, 2009).

Para una muestra inorgánica conductora simplemente se debe limpiar la superficie con cuidado de no dañarla para ello se usa acetona y un aparato ultrasónico para desprender las suciedades de la muestra por efecto cavitación (Behrisch, 1981).

La imagen que se forma en un Microscopio Electrónico de Barrido a diferencia del TEM donde la imagen se forma con los electrones del haz que traspasan la muestra, en el Microscopio Electrónico de Barrido la imagen se genera con los electrones que rebotan sobre la superficie de la muestra. Estos electrones dan información sobre las características topográficas de la muestra. Es decir, la calidad de la imagen que se obtenga dependerá de la capacidad que tenga la muestra para emitir electrones (William, 2006).

Así que la preparación de muestras conductoras solo consiste en su limpieza pegado sobre el porta muestras, utilizando para ello un pegamento especial conductor. En el caso de muestras no conductoras se requiere un recubrimiento por película delgada de un elemento conductor. La preparación de muestras es, en general, sencilla (Alcides, 2009).

Los requisitos indispensables que deben cumplir son ausencia de líquidos, es decir, la muestra tiene que estar seca y además debe ser conductora de la corriente eléctrica. Este último requisito se cumple en los metales, pero no así en otro tipo de materiales, por lo que para hacer a la muestra conductora se recubre de una capa de algún material conductor tal como el carbón o el oro (William, 2006).

Este recubrimiento ha de ser suficientemente grueso como para que circule la corriente eléctrica que se deposita en la muestra y suficientemente delgado para que no enmascare o tape las características superficiales de interés. Un proceso muy utilizado para recubrir con películas conductoras es el Sputtering y Evaporación Térmica (Alcides, 2009).

3.16.1.1. Las monturas que sostienen las muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido

Las monturas pueden ser de carbón o de aluminio. Vienen en distintas formas y tamaños. Las monturas más usadas están hechas de una aleación de Aluminio que es seleccionado por su fácil maquinado y donde las superficies son pulidas primero por métodos mecánicos y luego mediante técnicas metalográficas, se obtiene un terminado de espejo; esta montura es ideal para estudios que requieren superficies totalmente lisas (William, 2006).

3.16.1.2. Cintas Conductoras

Para pegar la muestra a la montura se utilizan cintas o pegamentos conductores, las más requeridas son las cintas de carbón y las cintas de cobre. Son pegamentos de dos caras, cintas eléctricamente conductoras fueron desarrollados para adjuntar muestras para ser examinadas por el Microscopio Electrónico de Barrido (Behrisch, 1981).

3.16.1.3. Cintas Conductoras de Cobre

Las cintas de cobre además de ser conductoras y adhesivas proveen un fondo ideal contra el que puede observarse el espécimen. El uso de cintas reduce considerablemente la cuenta de rayos X.

Las ventajas de usar cintas de cobre son:

- Permite la montura de muestras sin contaminación de pintura de plata o carbón.
- Permite la montura de muestras altamente porosas o absorbentes sin distorsión generada por líquido absorbido por la muestra.
- Proveen buena conductividad.
- Las cintas conductoras de carbón, así como es conductor y adhesivo no tienen casi ninguna estructura perceptible y proporciona el fondo ideal para ver su espécimen entero. El empleo de las cintas también reduce enormemente las cuentas de rayo X de fondo, dando una exactitud mayor (Andersen, 1981).

3.16.1.4. Plata coloidal

Consisten en las partículas de plata minúsculas suspendidas en una base líquida la cual es conductora. Es utilizado en la preparación de muestras para SEM como pegamento cuando la muestra es orgánica generando una conexión entre la muestra y un camino de descarga de los electrones (Behrisch, 1981).

3.16.1.5. Pulverización Catódica (Sputtering)

El proceso de pulverización catódica es principalmente un proceso de bombardeo iónico, que consigue la deposición en fase de vapor, sobre un sustrato de vidrio, del material bombardeado (Behrisch, 1981).

En esta técnica, los iones formados en un plasma son acelerados hacia el material que se desea depositar, mediante un campo eléctrico. El alto voltaje entre el cátodo y el ánodo provoca que los iones del gas de proceso (como el argón) golpeen el blanco con la energía suficiente para arrancar átomos de la superficie del cátodo mediante un proceso de transferencia de momento (William, 2006).

Cuando el ión golpea la superficie del material, transfiere parte de su energía a los átomos que lo forman, y se produce entonces una colisión en cascada. Las múltiples colisiones hacen posible que algunos átomos del material adquieran la suficiente energía para abandonar la superficie, alcanzar el sustrato y adherirse a él.

La mayor parte de la energía proporcionada por los iones incidentes se transforma en calor, siendo este disipado mediante un circuito de refrigeración que evita el sobre calentamiento del cátodo (Alcides, 2009).

3.16.1.6. Técnica de recubrimiento con Oro(Sputtering)

Cuando el propósito del análisis de una muestra no incluye la obtención de un espectro de RX, un elemento que se utiliza frecuentemente para recubrir la superficie es el oro. Consiste en una fuente de alimentación en corriente continua regulable de 1 a 3 KV conectada por una parte a una tarjeta de oro-paladio y por otra parte al porta muestras. El conjunto va acoplado a una bomba de vacío (Behrisch, 1981).

La introducción de un gas tal como el argón en la campana de vacío provoca que los átomos de argón impacten en la tarjeta de oro y se desprendan átomos de dicha tarjeta que son atraídos hacia la muestra en la cual quedan depositados proporcionando un espesor de recubrimiento que depende del tiempo de exposición (Andersen, 1981).

3.16.1.7. Técnica de recubrimiento con carbono (Evaporación Térmica)

En el caso de precisarse un análisis elemental en una muestra no conductora es necesario recubrir la superficie de un elemento lo más transparente posible a los RX. Este elemento es el carbono. Uno de los tipos de metalizadores de carbono se muestra esquemáticamente en el gráfico (Alcides, 2009).

Consiste en dos electrodos conectados a una fuente de corriente alterna de bajo voltaje y alta intensidad entre los que se intercala una barra de carbono terminada en una punta afilada. Al pasar la corriente, la punta de la barra se va evaporando, de forma que rocía la muestra con una fina capa de carbono. La punta va acoplada a un muelle que la mantiene en todo momento en contacto con el otro electrodo. Todo el conjunto está encerrado en vacío con el fin de facilitar la deposición de la película de carbono sobre la muestra (Alcides, 2009).

4 Justificación

El proyecto de investigación que se desarrolló dentro de la Maestría en ciencias y Tecnología de la Madera, Se enfocó a la realización de pruebas no destructivas en la madera de dos vigas de diferentes especies y con otra madera en condiciones normales por métodos de ultrasonido.

En la actualidad, en México no se cuenta con profesionales que apliquen estos métodos no invasivos para la evaluación de la resistencia y el deterioro de la madera estructural en las edificaciones históricas. Este trabajo plantea sentar las bases para que este tipo de evaluaciones sean posibles y se apliquen a edificaciones que cuentan con un valor histórico, artístico y arquitectónico.

Debido a la importancia que se tiene en Morelia de conservar su centro histórico, este trabajo resulta importante para varios sectores de la sociedad relacionados con el tema de la conservación. Este trabajo apoya al entendimiento y la aplicación de una nueva herramienta que mejora el panorama de cómo es posible abordar y resolver los inconvenientes que se presentan en las restauraciones, de los elementos de madera, permitiendo su conservación y protección en una mejor respuesta y acción en su conservación.

5 Hipótesis

La utilización de los métodos de ultra sonido en probetas de pino deterioradas y no deterioradas, permiten obtener parámetros como la atenuación, la velocidad de onda y el módulo de Young, que a su vez indican la resistencia mecánica para su uso estructural en edificios históricos.

6 Objetivos

6.1 Objetivo General

Determinar a nivel laboratorio la Velocidad de Onda, el Módulo de Young y la Atenuación Ultrasónica mediante la aplicación de técnicas no destructivas, ultra sónicas en muestras de madera sanas y de madera deteriorada, para con ello sentar las bases para análisis de elementos de madera en in situ.

6.1.1 Objetivos específicos

- Determinar el módulo de elasticidad y el módulo de corte por medio de la velocidad longitudinal y la velocidad transversal respectivamente y la atenuación de la onda ultrasónica, mediante el método de emisión transmisión en muestras deterioradas y no deterioradas de madera de pino.
- Comparar estadísticamente los resultados obtenidos de las mediciones del módulo de elasticidad, del módulo de corte, la velocidad longitudinal, la velocidad transversal y la atenuación entre los tres tipos de madera de pino, la madera sana y las dos vigas de madera denominadas 1 y 2.

7 Materiales

7.1 Condiciones de las vigas, previas a la obtención de las muestras

El material empleado para el caso de estudio es madera de pino de tres calidades. La primera es madera nueva en óptimas condiciones, la cual no ha sido sometida a ningún tipo de esfuerzo estructural. La segunda es madera envejecida al igual que la tercera, pero esta última, presenta un deterioro por factores biológicos y de esfuerzos de carga. Este grupo pertenecen a dos vigas de madera de pino, provenientes del Museo Casa Natal de Morelos (ver figura 7.1) Estas vigas fueron retiradas de este edificio tras una remodelación de este. En esta adecuación participo el Doctor José Cruz de León, asesor de esta tesis, siendo él la persona que proporciono dicho material (ver figura 7.2). El material sano fue obtenido de un aserradero de manejo forestal en el municipio de Charapan (ver figura 7.4).



Figura 7. 1(A) Vista interior de la vigería del Museo, (B) Vista del segundo patio interior y (C) Vista interior del estado actual la vigería y Archivo Histórico Casa de Morelos.



Figura 7. 2 Vigas actuales de madera de pino nacional, (A y B) Secciones de vigas, de madera de pino nacional.

Como se puede observar en las fotografías anteriores las vigas 1 y 2 fueron retiradas del edificio por no estar en las condiciones adecuadas para seguir formando parte de la estructura de soporte; posterior a su retiro también estuvieron expuestas a los efectos climatológicos.

La viga número 1, originalmente tenía una sección rectangular de 12.7 centímetros por 21.5 centímetros y una longitud de 6 metros. La viga número 2, contaba con una sección de 11 centímetros por 18.5 centímetros y su longitud total de 6 metros. En la figura 7.2 es posible observarlas. Para su manejo se procedió a su limpieza y fue necesario seccionarlas en seis partes para su manipulación y estudio, como se observa en la figura 7.3

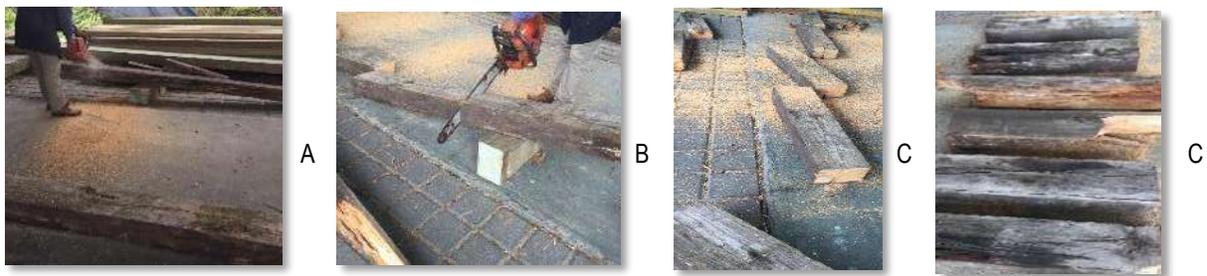


Figura 7. 3 (A) se muestran las vigas 1 y 2 (B) al momento de ser seccionadas y (C) las secciones resultantes de estos coretes

Se marcaron cada una de las partes las vigas y se cortaron a cada metro. Al efectuarse los cortes la sección central de la viga 1 sufrió un resquebrajamiento producto del corte efectuado, consecuencia del grado de humedad que estas vigas presentaban. Debido a esta humedad las vigas presentaban en algunas zonas hongos blancos. Estos dos factores los hongos y la humedad provocaron la pérdida de una de las puntas de la viga 1, que es la más deteriorada.

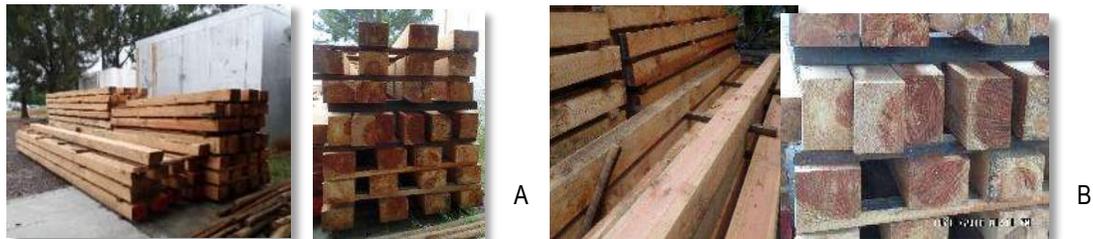


Figura 7. 4 (A) y (B) se muestran las vigas de madera sana

Una vez realizados los cortes de las vigas 1 y 2. Se apilaron y se guardaron por un periodo de 3 meses para poder ser secadas de manera lenta, evitando así que estas piezas se agrietaran o se deformaran, como se puede ver en las figuras 7.5.

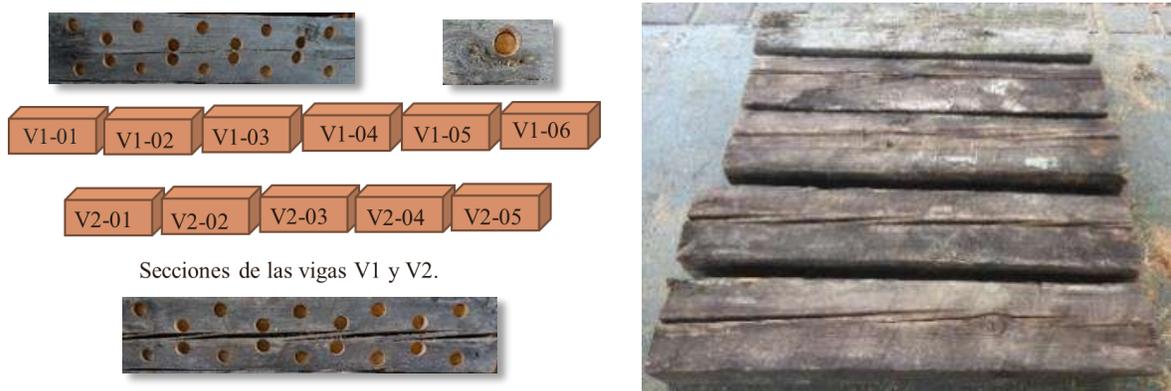


Figura 7. 5 Se muestran las secciones de vigas 1 y 2 apiladas para ser secadas

Después de transcurrido el tiempo necesario para que estas estuvieran con un contenido de humedad del 12% como indica la norma para las pruebas de madera. Cada parte de la viga fue numerada y direccionada siguiendo el orden en que se encontraban antes del corte y colocándolas en el sentido en que estas estaban en el momento de su

funcionamiento como parte de la estructura del edificio. Las mediciones de la longitud y del peso de los tramos de las vigas fueron realizadas utilizando: Balanza electrónica marca Torrey pcl, Vernier marca Mitutoyo 138952, Flexómetro marca Stanley y para el registro fotográfico de todo el proyecto se empleó una cámara digital marca Sony con montura A o68 con sensor APS-C.

Se midieron las secciones y se nombraron las caras con las letras C A y C B. En el sentido longitud de cada lado se usaron las letras L A y L B para cada una de las partes seccionadas. Se pesaron cada una de las secciones en las que fue dividida cada viga (ver figura 7.6).

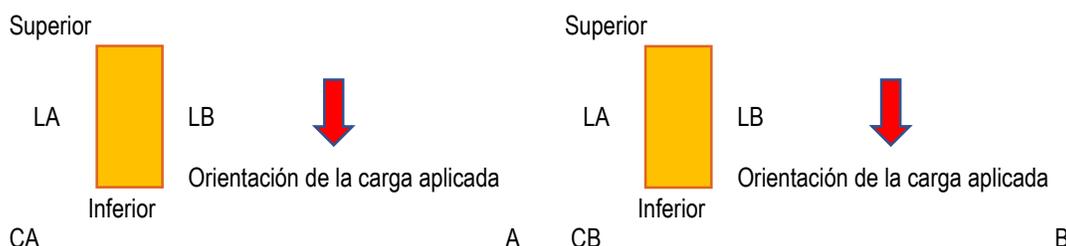


Figura 7. 6 (A) Representación de la Cara A, de las secciones de las vigas. (B) Representación de la Cara B, de las secciones de las vigas

7.2 Características de las secciones de las vigas

7.2.1 Viga 1

La Sección V1-01 es uno de los extremos de la viga 1; esta parte se encontraba empotrada entre la parte superior del muro y la cubierta. Esta sección se encontró sometida a fuerzas de cortante, A esta sección se le extrajeron diferentes tipos de muestras para los distintos estudios de este trabajo. medio círculo en la parte horizontal mide 6.7 cm y en la vertical 12.5 cm. La figura 3. 23 que a continuación se muestran, es posible ver las condiciones que presentaba esta sección.

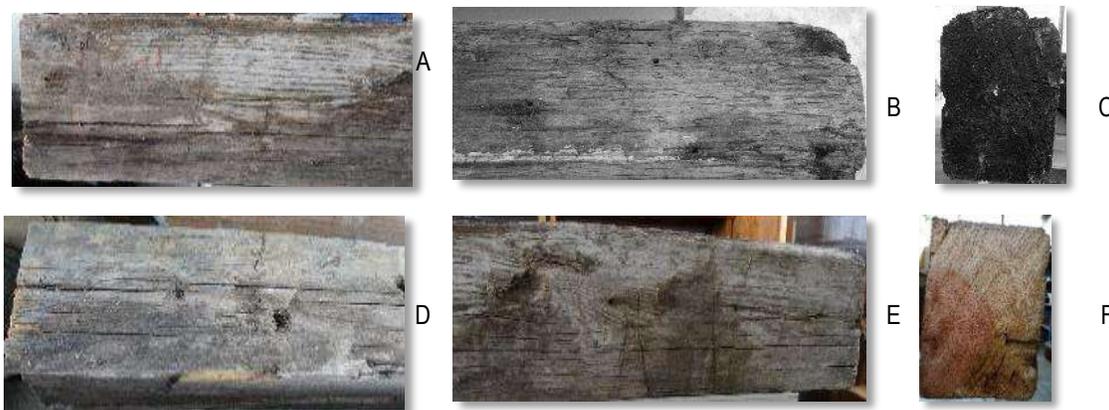


Figura 7. 7 (A) lado L A, (B) lado L B, (C) cara C A, (D) vista superior, (E) vista inferior, (F) cara C B de la sección V1-01

Se contaron los anillos de la cara CA V1-01 donde, se aprecian 25 anillos hacia la parte superior derecha tomando el centro del lumen el cual muestra 11 anillos y en la parte horizontal 14 anillos. Como se ve en la figura 7.8.

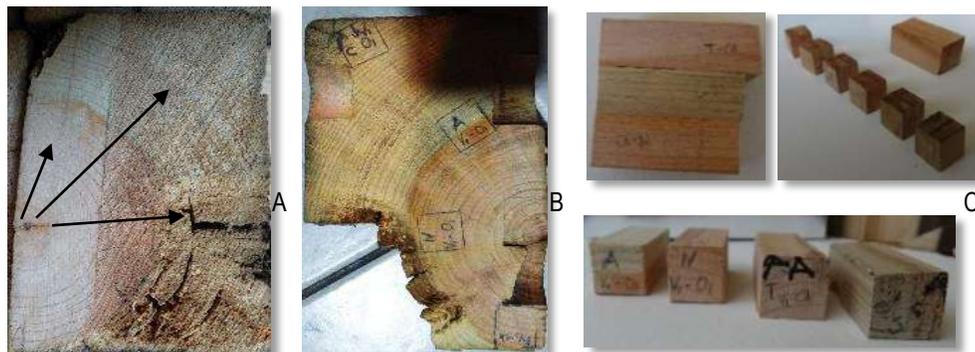


Figura 7. 8 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-01

La Sección V1-02 de la viga 1, tiene unas dimensiones en la cara C A de 11.18 x 2.47 x 11.18 x 5.06 cm. En la cara C B 11.06 x 17.2 x 11.51 x 17.5 cm y una longitud de 103 cm. En la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 5.9 cm y en la vertical 10.49 cm.

Pero la cara C A está deteriorada al grado que no es posible medir la sección total ni el duramen. El peso es de 6.905 kg. Las figuras 7.9 que a continuación se muestran, es posible ver las condiciones

Las dimensiones de esta sección son; en la cara A 11.84 x 17.8 x 12.12 x 17.4 cm. En la cara B 18.84 x 18.4 x 11.33 x 18.4 cm y una longitud de 99 cm. En la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal que presenta esta sección.

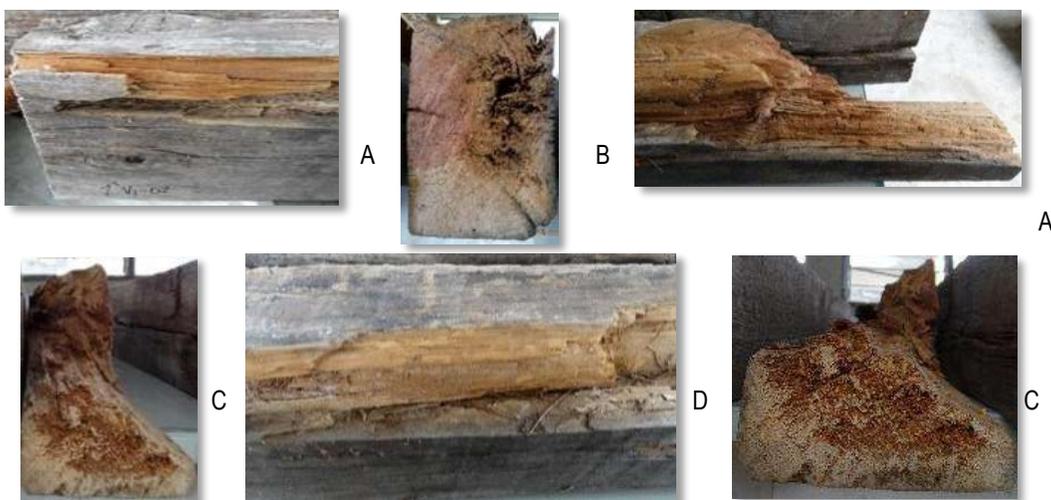


Figura 7. 9 (A) Sección 2 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) cara C B, (D) lado L B de la sección V1-02

Se contaron los anillos de la cara CB V1-02 donde, se aprecian 12 anillos hacia la parte superior derecha tomando el centro del lumen el cual muestra 10 anillos y en la parte inferior hacia el lado izquierdo en la parte inferior cuenta con 23 anillos, ver figura 7.10.

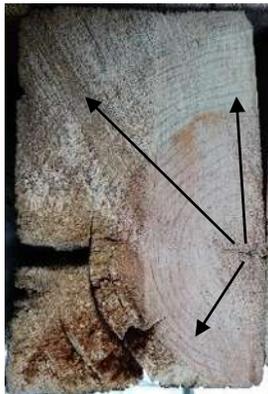


Figura 7. 10 Cara B de la sección V1-02

La Sección V1-03, tiene unas dimensiones en la cara C A de 11.71 x 18.4 x 12.25 x 18.4 cm. En la cara C B 11.6 x 6.4 x 11.75 x 16.6 cm y una longitud de 102 cm. En la cara C A se aprecia perfectamente la sección total y el duramen en la parte horizontal tiene una medida de 7.36 cm y en la parte vertical 13.34. En la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 5.19 cm y en la vertical 11.29 cm. Pero la cara C B está deteriorada, pero es posible ver el duramen. El peso de esta sección es de 9.680 kg, (ver figura 7.11).

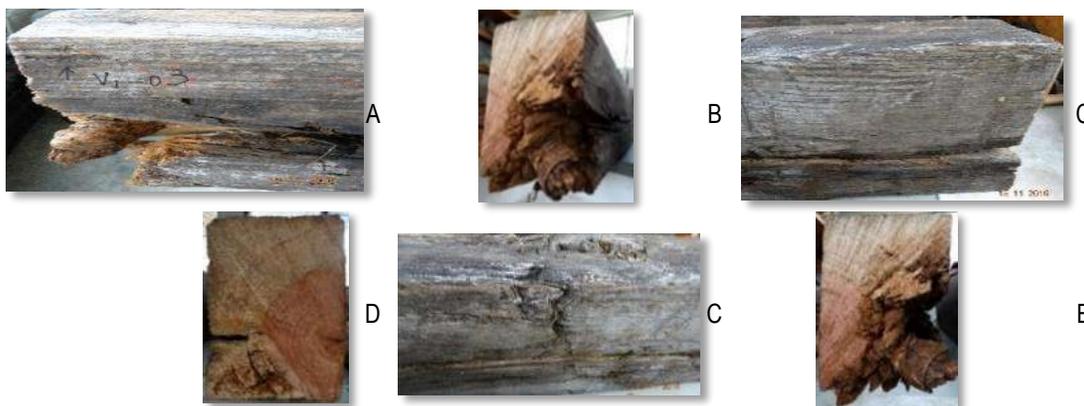


Figura 7. 11 (A) Sección 3 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-03

Los anillos de la cara CA V1-03 donde, se aprecian 21 anillos hacia la parte inferior izquierda tomando el centro del lumen el cual muestra 11, y en la parte horizontal 12 anillos y finalmente hacia la parte superior vertical 15 anillos, (ver figura 7.12).

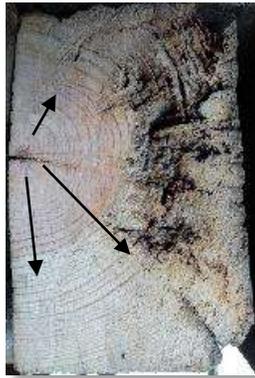


Figura 7. 12 Cara B de la sección V1-03

La Sección V1-04, tiene unas dimensiones en la cara C A de 11.43 x 16.1 x 1.37 x 6.9 cm. En la cara C B 11.87 x 7.3 x 1.03 x 13.5 cm y una longitud de 102 cm. En la cara C A se aprecia que la sección está muy deteriorada y el duramen en la parte horizontal tiene una medida de 5.61 cm y en la parte vertical es de 1.15 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 11.48 cm y en la vertical 3.99 cm. Las caras C A y C B están deterioradas, pero es posible ver el duramen únicamente en la cara C B. El peso es de 5.625 kg. La figura 7.13 muestra las condiciones de este segmento.

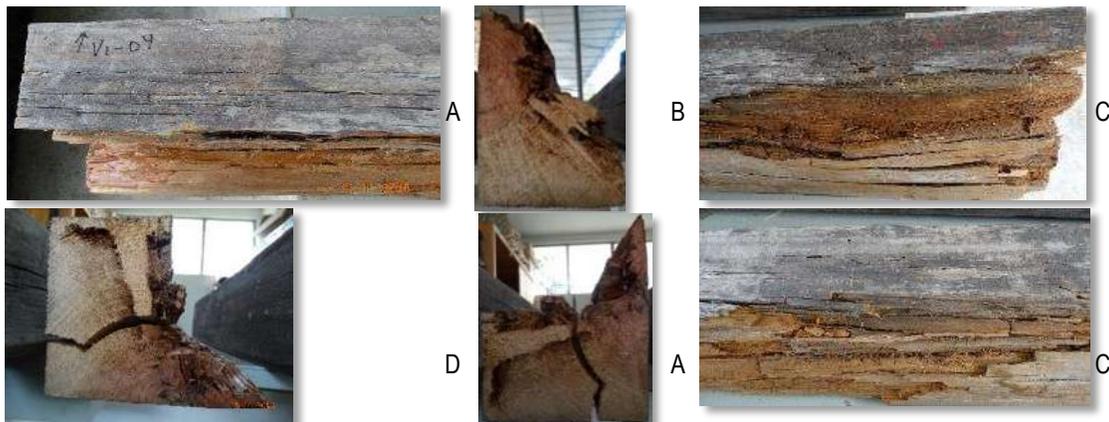


Figura 7. 13 (A) Sección 4 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-04

En el caso de esta sección los anillos de la cara CA V1-04, no fue posible hacer un recuento debido al gran deterioro que esta presentaba. Por este motivo se contaron los anillos de la cara CB V1-04 donde, se aprecian 26 anillos hacia la parte superior derecha tomando el centro del lumen el cual muestra 7 anillos. Es una pieza que presenta mucho deterioro de su sección, (ver figura 7.14).



Figura 7. 14 Cara B de la sección V1-03

La Sección V1-05 es el otro extremo de la viga 1; esta parte se encontraba también empotrada entre la parte superior del muro y la cubierta. Esta sección se encontró sometida a fuerzas de cortante, (ver punto 5.9 del documento de avances anterior). A esta sección se le extrajeron también diferentes tipos de muestras para los estudios de este trabajo. La Sección V1-05, tiene unas dimensiones en la cara C A de 10.69 x 17.5 x 11.14 x 17.2 cm. En la cara C B 10.97 x 7.7 x 11.36 x 7.9 cm y una longitud de 97.2 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 6.20 cm y en la parte vertical es de 12.63 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 5.96 cm y en la vertical 10.56 cm. Las caras C A y C B no están tan deterioradas. El peso es de 8.960 kg. La figura 6.20 muestran las condiciones de este segmento, (ver figura 7.15).

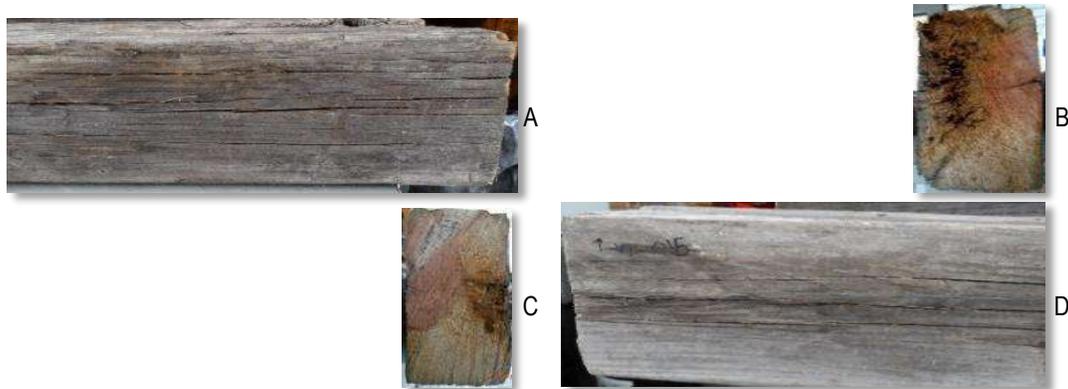


Figura 7. 15 (A) Sección 5 de la viga 1 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V1-05

En la cara CA V1-05, se aprecian 27 anillos hacia la parte inferior izquierda tomando el centro del lumen el cual muestra 9 anillos, y en la parte superior derecha 12 anillos de crecimiento, en la parte horizontal 11 anillos y en la parte inferior 22, (ver figura 7.16).

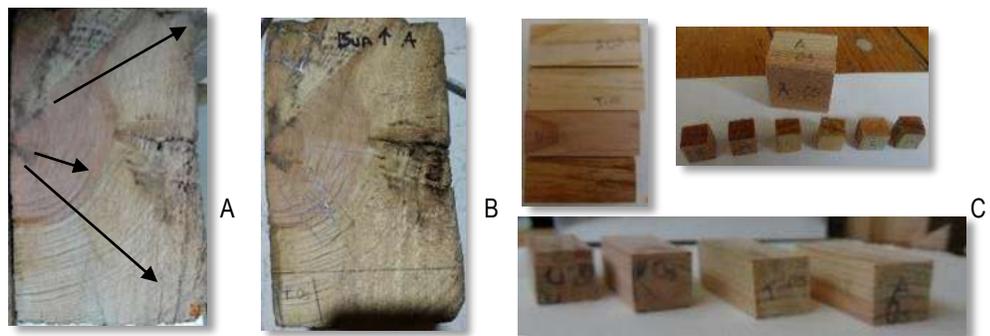


Figura 7. 16 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-05

7.2.2. Viga 2

Se midieron todas las secciones de la viga 2, al igual que en el caso de la viga 1. La Sección V2-01, tiene unas dimensiones en la cara C A de 12.66 x 17.9 x 12.76 x 18 cm. En la cara C B 10.74 x 10 x 7.62 x 17.7 cm y una longitud de 101 cm. En la cara C A se observa que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 3.7 cm y en la parte vertical es de 3.33 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 3.25 cm y en la vertical 3.23 cm. La cara C A muestra la punta deteriorada de la viga la cual estaba en contacto con el muro del techo que sustentaba y la cara C B el duramen. El peso de este tramo es de 9.580kg (ver figura 7.17)

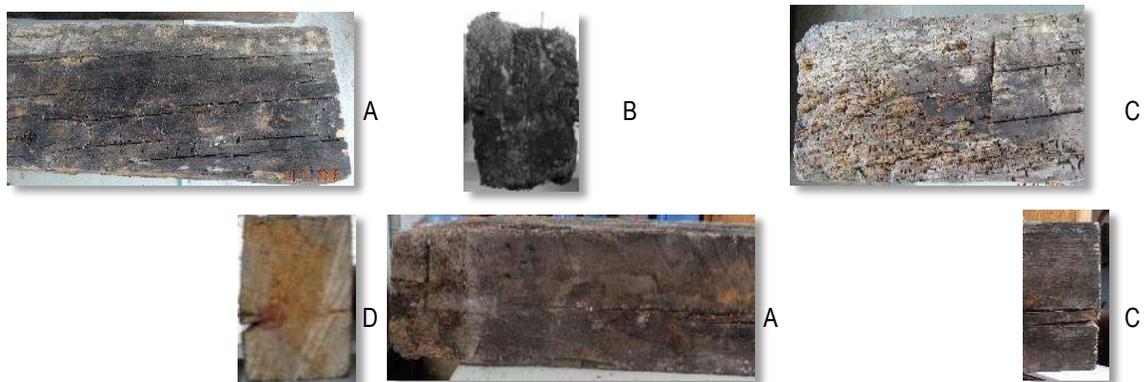


Figura 7. 17 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-01

Los anillos de la cara CB V2-01 es posible ver el lumen de pequeñas dimensiones. Basándonos en el centro del lumen hacia la parte superior derecha encontramos 2 anillos de crecimiento, se observan en la albura 19 anillos de crecimiento, en la parte horizontal 12 anillos y finalmente en la parte inferior derecha 10 anillos, (ver figura 7.18).

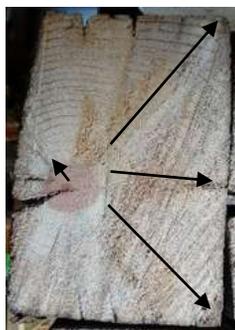


Figura 7. 18 Cara B de la sección V2-01

La Sección V2-02, tiene unas dimensiones en la cara C A de 13.25 x 17.9 x 13.41 x 18 cm. En la cara C B 12.62 x 10 x 12.84 x 17.7 cm y una longitud de 99 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 15.16 cm y en la parte vertical es de 15.04 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 3.65 cm y en la vertical 3.19 cm. Las caras C A y C B presentan un duramen pequeño desfasado del centro. El peso es de 10.060 kg para este tramo (ver figura 7.19).

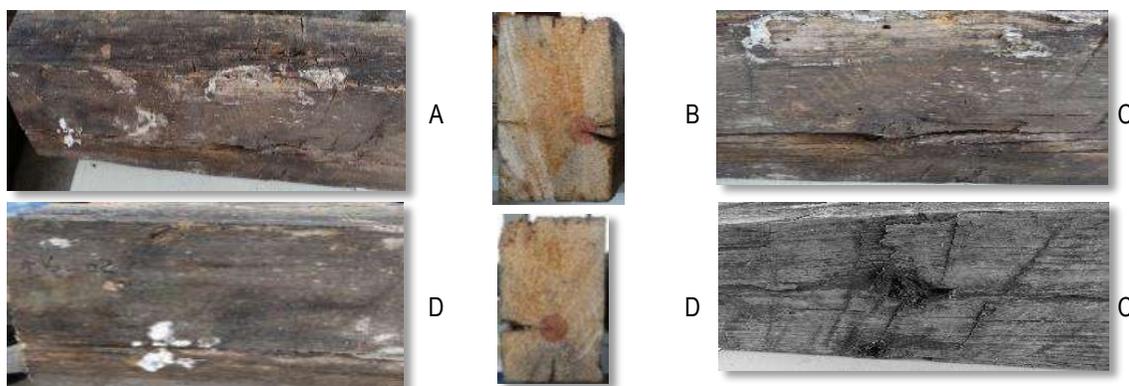


Figura 7. 19 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02

Los anillos de la cara CA V2-02, se aprecia un lumen de pequeñas dimensiones, desfasado del centro de la sección. Basándonos en el centro del lumen hacia la parte superior derecha tomando el centro del lumen el cual muestra 2 anillos y se observan en la albura 17 anillos de crecimiento, en la parte horizontal derecha 5 anillos, en la parte horizontal izquierda 9 y finalmente en la parte inferior izquierda 11 anillos, (ver figura 7.20).

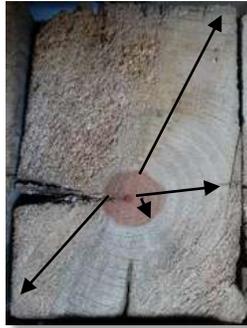


Figura 7. 20 Cara B de la sección V2-02

La Sección V2-03 es la parte central de la viga 2; esta área fue sometida a los efectos de flexión produciendo tracción y compresión, siendo la parte más crítica. Esta sección se encontró sometida a fuerzas de cortante. Debido a la ubicación de esta sección se decidió realizar diferentes tipos de muestras para los distintos estudios del trabajo.

La Sección V2-03, tiene unas dimensiones en la cara C A de 13.21 x 17.9 x 14.41 x 18 cm. En la cara C B 13.22 x 10 x 13.88 x 17.7 cm y una longitud de 99 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 3.75 cm y en la parte vertical es de 3.75 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 3.65 cm y en la vertical 3.19 cm.

Las caras C A y C B no están tan deterioradas, pero se aprecia un nudo dentro del duramen. El peso en este caso fue de 10.660 kg (ver figura 7. 21)

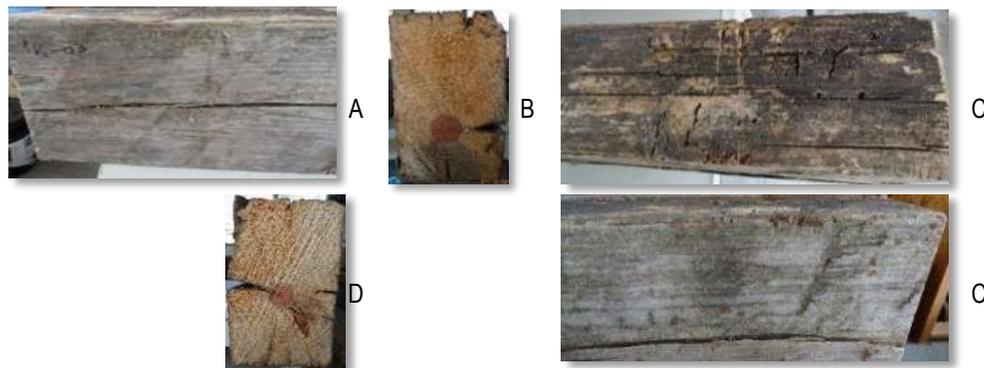


Figura 7. 21 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02

Los anillos de la cara CA V2-03, podemos observar el lumen desfasado del centro de la sección. Tomando el centro del lumen hacia la parte superior izquierda muestra 2 anillos de crecimiento observándose en la albura 17 anillos de crecimiento. En la parte horizontal derecha 9 anillos, en la parte horizontal izquierda 5 y finalmente en la parte inferior izquierda 8 anillos, (ver figura 7.22).

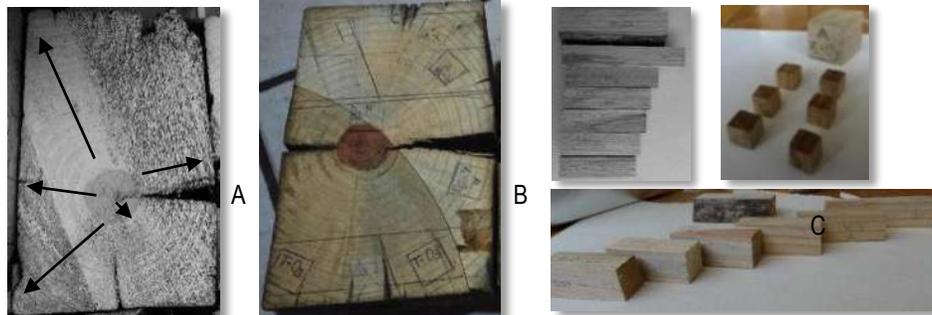


Figura 7. 22 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V1-05

La Sección V2-04 es uno de los que conforman la parte central de la viga 2; esta área como la anterior, fueron sometidas a los efectos de flexión produciendo tracción y compresión, ambas secciones conforman la zona crítica de la viga. Debido a la ubicación de esta sección se decidió realizar diferentes tipos de muestras para los distintos estudios del trabajo. La Sección V2-04, tiene unas dimensiones en la cara C A de 13.42 x 17.9 x 913.84 x 18 cm. En la cara C B 13.42 x 10 x 13.27 x 17.7 cm y una longitud de 101 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 3.72 cm y en la parte vertical es de 3.09 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 3.42 cm y en la vertical 3.42 cm.

Las caras C A y C B no están tan deterioradas, siendo posible observar el duramen y las hace este factor buenas candidatas para el muestreo para microscopio. El peso en esta zona fue de 10.400 kg. La figura 7.23 muestra las condiciones del material.

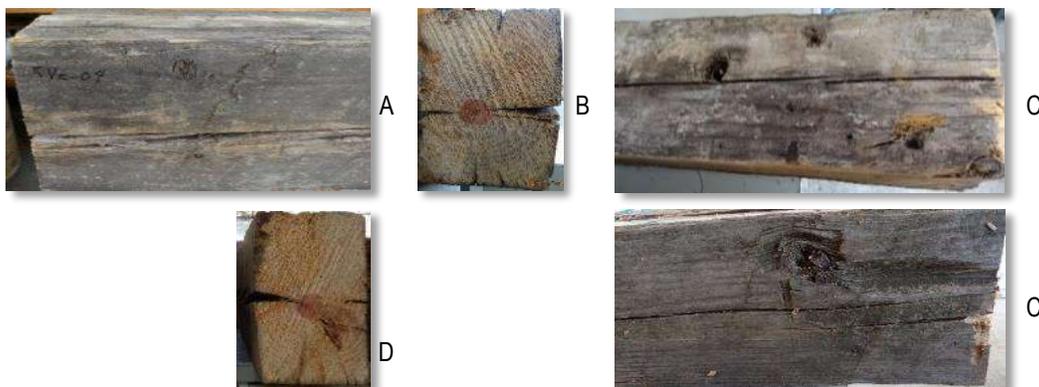


Figura 7. 23 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-04

Los anillos de la cara CA V2-04, presenta el lumen de pequeñas dimensiones y desfasado del centro de la sección, como en las secciones anteriores. Tomando como referencia el centro del lumen hacia la parte superior izquierda el lumen presenta los 2 anillos de crecimiento, como las otras secciones. Se observan en la albura 15 anillos de crecimiento y en la parte horizontal derecha 10 anillos, en la parte horizontal izquierda 5 y finalmente en la parte inferior

izquierda 13 anillos. La cara B fue seleccionada para ser utilizada para la toma de muestras para los microscopios ópticos, electrónicos y para obtención de material disociado. Ver figura 7.24.

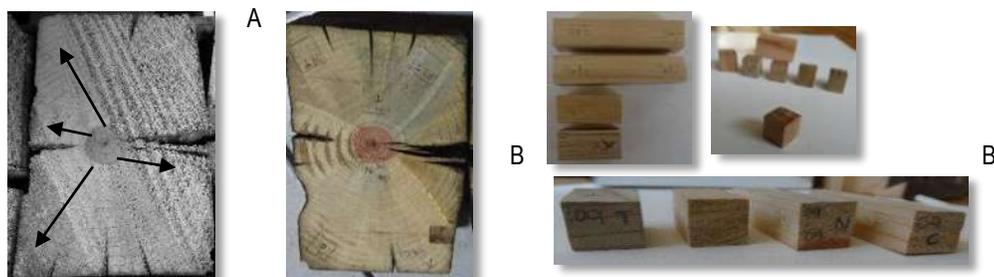


Figura 7. 24 (A) cara B (B) marcado para la extracción de las muestras para microscopio y disociado (C) muestras para microscopio óptico y electrónico, de la sección V2-04

La Sección V2-05, tiene unas dimensiones en la cara C A de 13.16 x 17.9 x 12.54 x 18 cm. En la cara C B 6.73 x 10 x 13.43 x 17.7 cm y una longitud de 98.5 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 3.15 cm y en la parte vertical es de 3.28 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 1.92 cm y en la vertical 2.23 cm. La cara C A no está deteriorada y se puede observar el duramen, mientras que la cara C B, no se aprecia casi nada del duramen debido al deterioro que presenta esta cara. El peso es de 8.040 kg para esta sección. (Ver figuras 7.25).

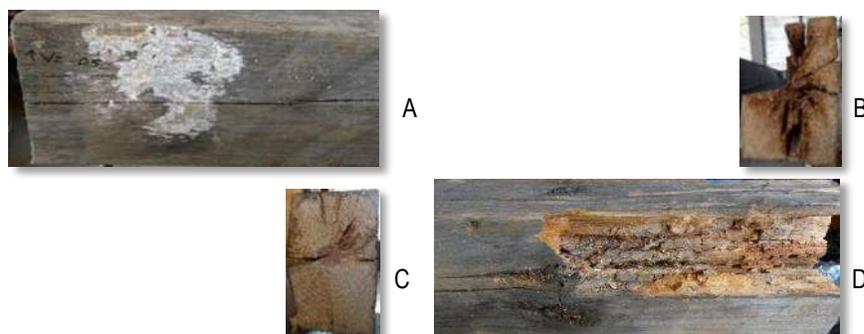


Figura 7. 25 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-05

En la cara CA V2-05, presenta el lumen desfasado del centro de la sección, como en las secciones anteriores, siendo este la referencia el centro del lumen hacia la parte superior izquierda el lumen presenta 2 anillos. Se observan en la albura 13 anillos de crecimiento y en la parte horizontal derecha 6 anillos, en la parte horizontal izquierda 7 y finalmente en la parte inferior derecha 13 anillos. Ver figura 7.26

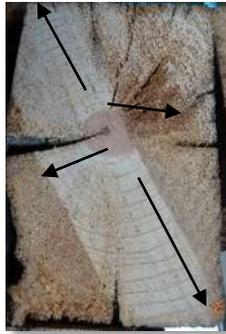


Figura 7. 26 Cara B de la sección V2-05

La Sección V1-06, tiene unas dimensiones en la cara C A de 10.67 x 17.9 x 9.77 x 18 cm. En la cara C B 10.04 x 10 x 6.92 x 17.7 cm y una longitud de 108 cm. En la cara C A se aprecia que la sección del duramen en la parte horizontal tiene una medida de 6.9 cm y en la parte vertical es de 11.1 cm y en la cara C B se puede observar la ubicación del duramen, en forma de medio círculo en la parte horizontal mide 5.96 cm y en la vertical 10.56 cm. Las caras C A y C B no están tan deterioradas, pero se aprecia un nudo dentro del duramen. El peso es de 8.900 kg. La figura 7.27 muestran las características del último tramo de viga.

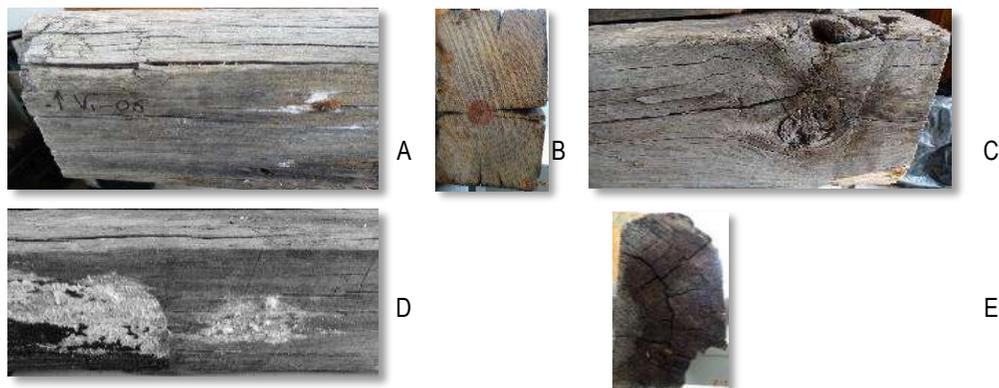


Figura 7. 27 (A) Sección 1 de la viga 2 lado A, (B) cara C A, (C) lado L B, (D) cara C B de la sección V2-02

En la cara CA V1-06, se aprecian 11 anillos hacia la parte inferior izquierda tomando el centro del lumen el cual muestra 3 anillos, y en la parte superior derecha 25 anillos de crecimiento, en la parte horizontal 13 anillos y en la parte inferior 7 (ver figura 7. 28)

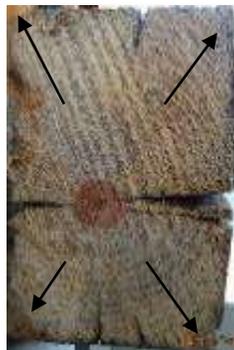


Figura 7. 28 Cara B de la sección V2-06

7.3. Criterio de muestreo de las secciones de vigas

Las vigas son elementos lineales estructurales y pueden ser fabricadas de distintos materiales. La madera cuando es sometida a cargas de compresión ya sea perpendicular al grano o paralela al grano, esta sufre deformaciones. En la figura 7.29 se observa un diagrama de momentos que representa las zonas en donde se decidió tomar las muestras, debido a los tipos de esfuerzos que estas piezas sufrieron, en la figura 7.30 se observa la forma en cómo trabajan las vigas bajo condiciones de cargas puntuales. (Ambrose, 2002).

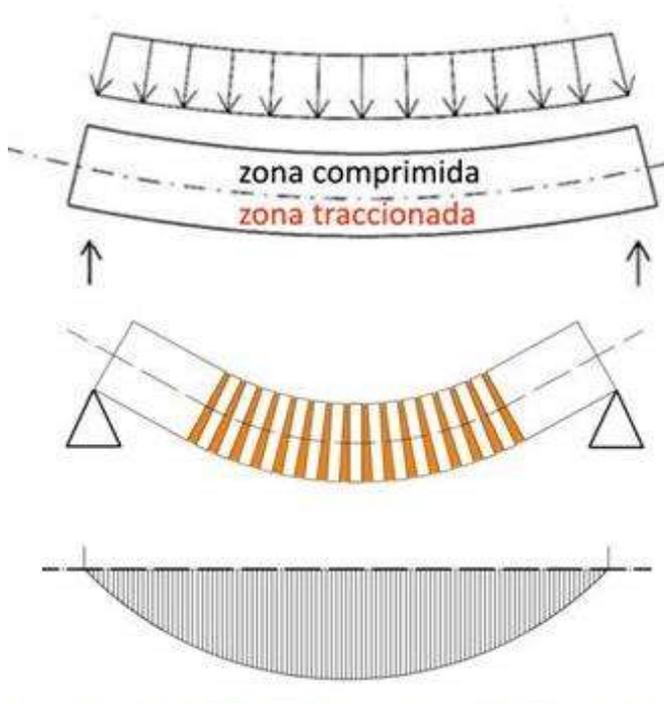


Figura 7. 29 Diagrama de momentos, donde vemos las fuerzas verticales y esfuerzos de flexión. Se pueden observar las zonas comprimidas y las zonas traccionadas



Figura 7. 30 Prueba de flexión estática tradicional

Posteriormente se identificaron los puntos donde serian tomadas las muestras en cada una de las secciones de ambas vigas. Se decidió tomar muestras en las cuatro caras de la viga.

En la parte superior del lado A y lado B, por ser los puntos en los que fue sometida a compresión y la parte inferior de los lados A y B que es la que estuvo sometida a tensión. Y en la parte central de ambos lados. En la parte superior que era el área donde se sustentaba la carga y en la parte inferior, como se explica en las figuras 7.31.

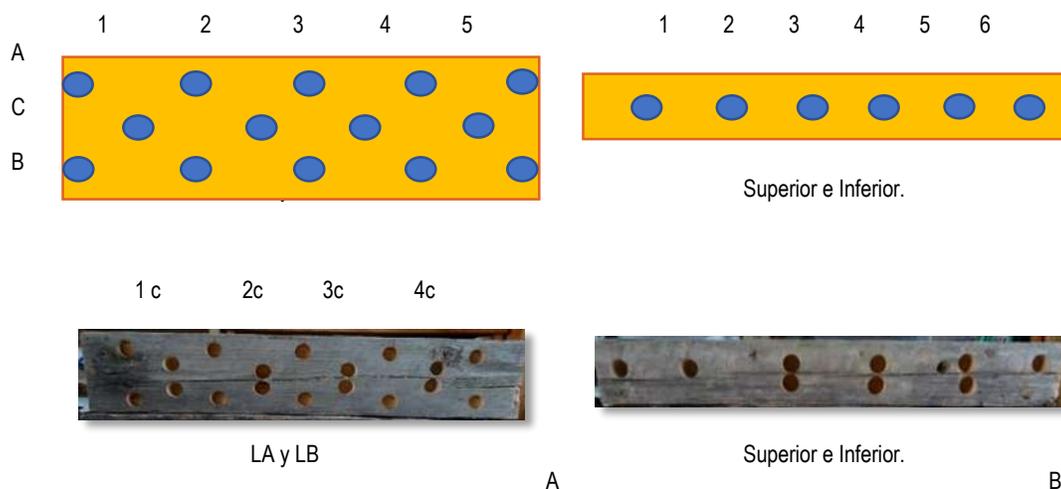


Figura 7. 31 (A) LA y LB (representación de los puntos donde fueron tomadas las muestras para cada uno de los lados A y B. Para cada sección de las vigas). (B) Representación de los puntos donde fueron tomadas las muestras para cada uno de los lados Superior e Inferior.

7.4. Material de muestras empleado para las imágenes microscópicas de la madera sana y deteriorada

En las vigas 1 y 2 se seleccionaron los trozos V1-01 (cara C B 18.84 x 18.4 x 11.33 x 18.4), V1-05 (cara C B 10.97 x 7.7 x 11.36 x 7.9 cm), V2-03 (cara C B 13.22 x 10 x 13.88 x 17.7 cm) y V2-04 (cara C B 13.42 x 10 x 13.27 x 17.7 cm); de las cuales se hicieron cortes de las caras antes mencionadas con un espesor de 10 cm; como se ve en las figuras 7.33, 7.34, 7.35, 7.36 y 7.37.

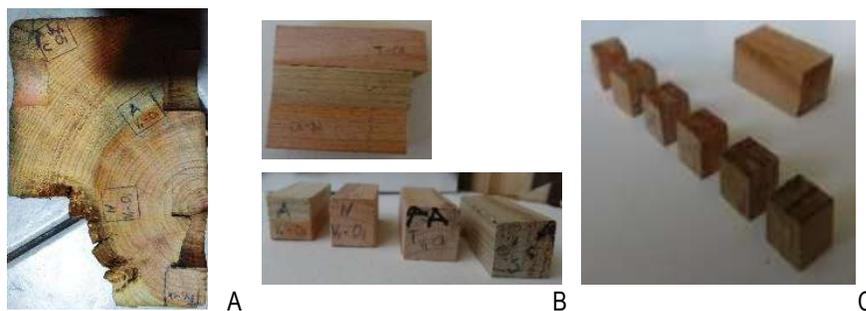


Figura 7. 32 Cortes de las caras viga 1 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico

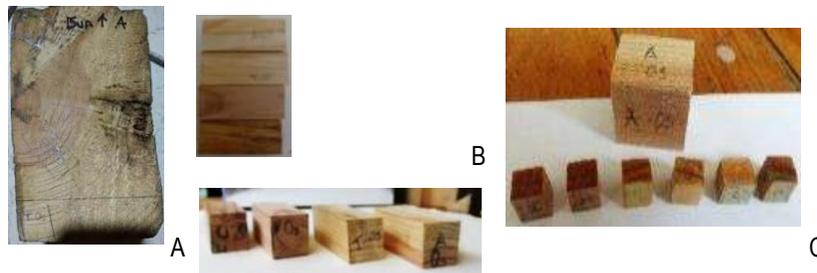


Figura 7. 33 Cortes de las caras viga 1 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico



Figura 7. 34 Cortes de las caras viga 2 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico

El muestreo se efectuó de la siguiente manera; se seleccionaron las áreas para recortar los cubos, denominándolos con la letra C las zonas superiores de las vigas donde fueron sometidas a compresión. La letra T para denominar a la parte inferior en donde actuaron las fuerzas de tensión y con la letra N a la zona central.

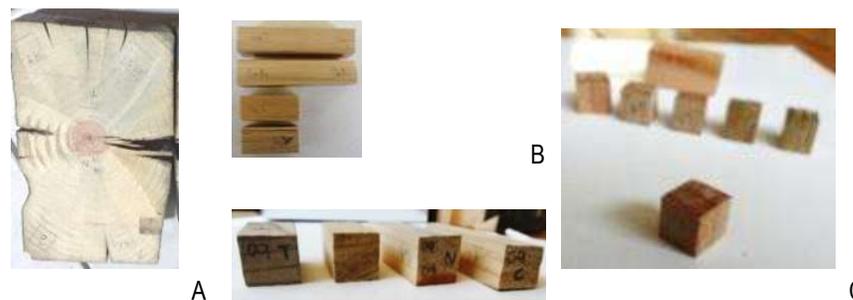


Figura 7. 35 Cortes de las caras viga 2 para muestras con un espesor de 10 cm. (A) Caras de las vigas, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico

En las muestras de madera sana es posible observar en la figura 7.37 los cortes radial, longitudinal y transversal.

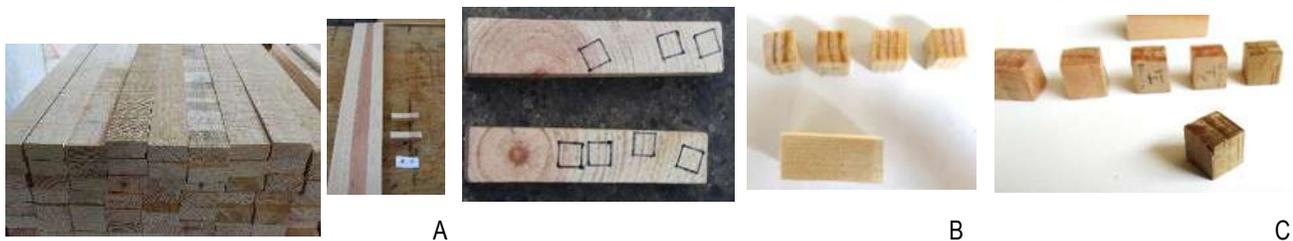


Figura 7. 36 Cortes de la madera sana para muestras con un espesor de 10 cm. (A) secciones de madera sana, (B) cortes para muestras histológicas, (C) cortes para muestras microscopio electrónico

7.5 Descripción anatómica de la madera de *pinus. muestra Viga 1*

7.5.1 Características organolépticas

La especie en estudio procede de vigas usadas en la construcción de edificios históricos, razón por la cual algunas de las características ya no son tan perceptibles. La madera presenta diferencia de color entre la albura y el duramen, la albura es de color blanco (HUE 2.5YR N/8 y 8/2) con vetas ligeramente más oscuras y el duramen rosado (HUE 5YR 8/4) con vetas color castaño naranja. El olor y sabor de la madera es tenue y característico ligeramente a resina. La textura es media tendiendo a fina, con hilo de recto a irregular en zonas cercanas a nudos. La madera posee veteado semipronunciado con diseño angular en la cara tangencial y diseño rayado y vetado en la cara radial, (Figura 7.37).



Figura 7. 37 Sección de la viga donde se obtuvo el material de estudio, mostrando coloración de albura y duramen

7.5.2 Descripción macroscópica y microscópica

Los anillos de crecimiento son notorios con transición semi gradual, presentan variación de color (crema en la madera temprana y castaño en la madera tardía), así mismo el ancho de los anillos varían entre 2.5-8 mm, se observa de un 10-15% de madera tardía, de 85-90% de madera temprana y radios son ligeramente notorios a simple vista. Los canales resiníferos se encuentran distribuidos irregularmente, se observan mayormente en la madera temprana.

Las traqueidas en sección transversal se aprecian de contorno hexagonal a irregular, con paredes de grosor delgadas, presentando en promedio 6.2 μm (3.7-9.8 μm), el diámetro de las traqueidas es de 44 μm (30 μm -57 μm). Las traqueidas son largas con longitud promedio de 5 μm (3.5- 6.0 μm). Las traqueidas presentan punteaduras areoladas de diámetro variable (22-27 μm) y abertura circular, el acomodo de las punteaduras es variable observándose en una hilera y en ocasiones en dos hileras, además presentan refuerzos tipo crásulas. Así mismo se observan traqueidas radiales con bordes semiaserradas (observándose en cara radial) y otras con bordes lisos, (Figura 7.38 y 7. 39).

Los **canales resiníferos** son de tipo tilosoides, con células de pared delgada, son de forma circular y diámetro promedio de 154 μm (87 μm – 223 μm), (Figura 7.38).

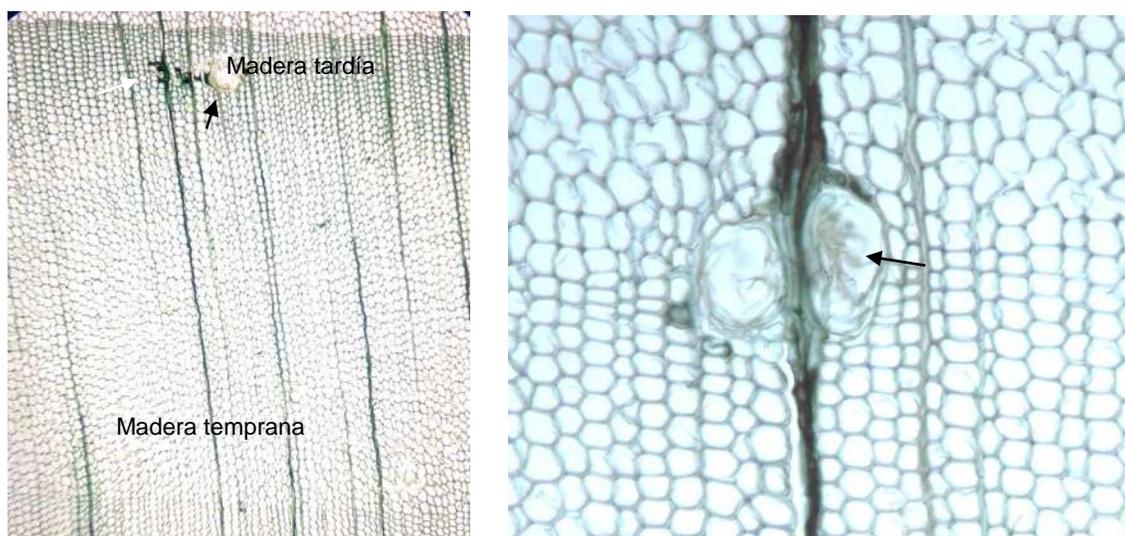


Figura 7. 38 Anillo de crecimiento visto a 40X con canal resinífero y parénquima leñoso (Izquierda), corte transversal visto a 100X mostrando contorno de las traqueidas y canales resiníferos (Derecha)

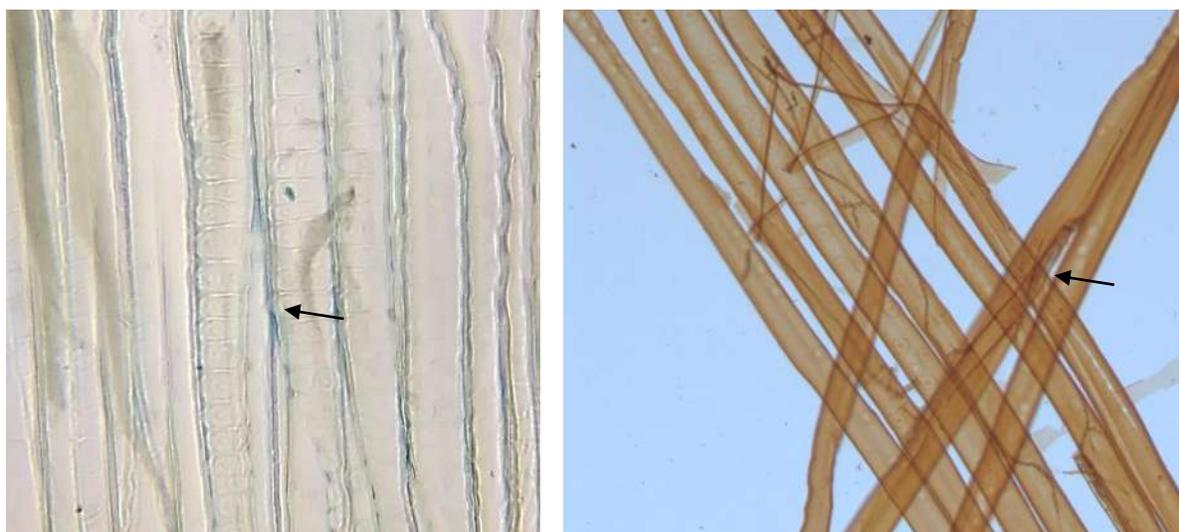


Figura 7. 39 Puntuaciones de areoladas en doble hilera vistas a 400X (Izquierda) y traqueidas en material disociado vistas a 200X (Derecha)

Los **Radios** son de composición homogénea y heterogénea de tipo uniseriados y fusiformes. Los uniseriados en promedio presentan 10 células de alto, encontrándose también de 1-19. La altura de los radios fusiformes es de 339 μm en promedio (242 μm -549 μm) y ancho promedio de 40 μm (22 μm -57 μm). La abundancia de radios por mm lineal en promedio es de 5 (4 a 7). Los radios fusiformes presentan canales resiníferos medianos con ancho promedio de 53 μm , (Figura 7 40).

Los **campos de cruzamiento** presentan puntuaciones pequeñas de 2-3 de tipo pinoide con reborde.

En la madera se observó la presencia de abundante parénquima leñoso en zonas cercanas a los canales resiníferos y también hifas de hongos en parénquima radial y traqueidas axiales, (Figura 7.41).

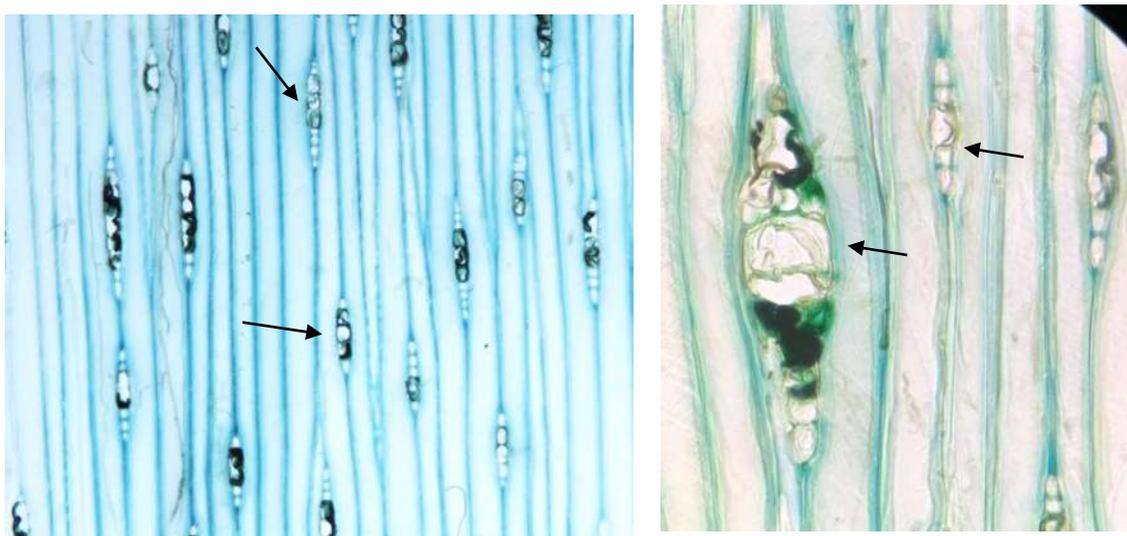


Figura 7. 40 Cortes tangenciales vistos a 100X y 400X, mostrando radios uniseriados de altura variable y radio fusiforme

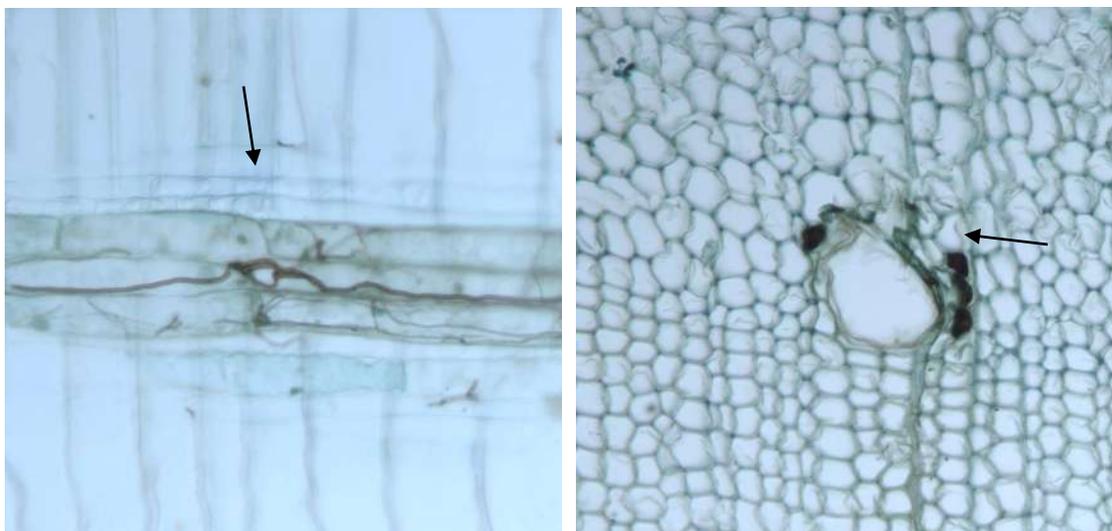


Figura 7. 41 Corte radial mostrando el ataque de los hongos en la madera (Izquierda), sección transversal con parénquima leñoso alrededor del canal resinífero (Derecha)

7.6 Descripción anatómica de la madera de *Pinus strobus* variedad *chiapensis*

Viga 2

7.6.1 Características organolépticas

La especie en estudio procede de vigas usadas en la construcción de edificios históricos, razón por la cual algunas de las características ya no son tan perceptibles. La madera presenta diferencia de color entre albura y duramen, la albura es de color blanco (HUE 10YR 8/2) con vetas castaño-rojizas y manchas cromógenas de color gris claro.

El duramen es de color rojo claro (HUE 2.5YR 6/6) con vetas color castaño naranja. El olor y sabor de la madera es tenue y característico ligeramente a resina. La textura es media tendiendo a fina, con hilo de recto a irregular en zonas cercanas a nudos. La madera posee veteado semipronunciado con diseño angular en la cara tangencial y diseño rayado y vetado en la cara radial, (Figura 7.42).



Figura 7. 42 Sección de la viga donde se obtuvo el material de estudio, mostrando la coloración de albura y duramen

7.6.2 Descripción macroscópica y microscópica

Los anillos de crecimiento son notorios con transición semi gradual, presentan variación de color (crema en la madera temprana y castaño en la madera tardía), así mismo el ancho de los anillos varía entre 5-9 mm, se observa de un 8-10% de madera tardía y 90-92% de madera temprana. Los radios son ligeramente notorios a simple vista junto con los canales resiníferos que se encuentran distribuidos irregularmente.

Las traqueidas en sección transversal se aprecian de contorno rectangular a poligonal irregular, con paredes de grosor media a gruesas, presentando en promedio $6.5 \mu\text{m}$ ($2.5\text{-}12 \mu\text{m}$), el diámetro de las traqueidas es de $36 \mu\text{m}$ - $78 \mu\text{m}$. Las traqueidas son largas con longitud promedio de 4.65 mm ($3.9\text{-}5.8 \text{ mm}$). Las traqueidas presentan punteaduras areoladas de diámetro variable ($17\text{-}27 \mu\text{m}$) y abertura circular, el acomodo de las punteaduras es variable observándose en una hilera e intercaladas con dos hileras, además presentan refuerzos tipo crásulas. Así mismo se observan traqueidas axiales en cadena y traqueidas radiales con paredes de semi aserradas a casi lisas, (Figura 7.43).

Los canales resiníferos son de tipo tilosoides, con células de pared delgada, son de forma circular y diámetro promedio de $123 \mu\text{m}$ ($97 \mu\text{m}$ – $165 \mu\text{m}$), (Figura 7.44).

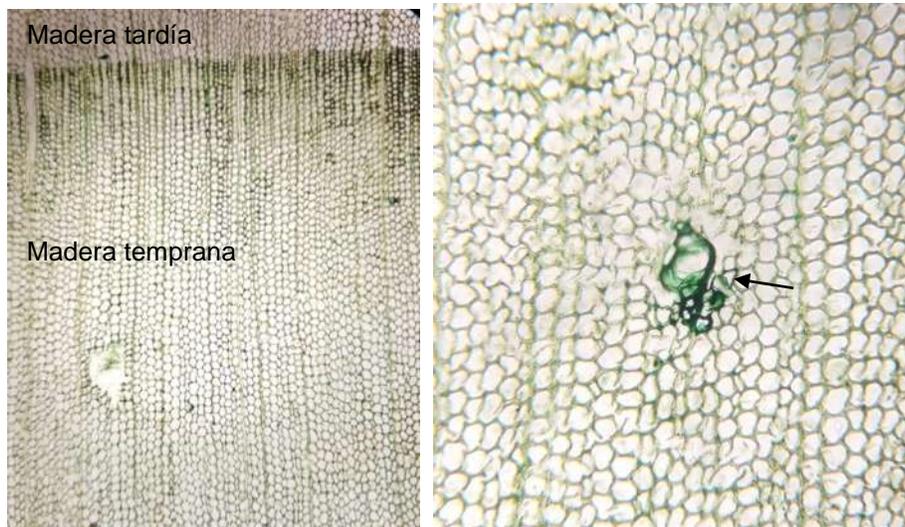


Figura 7. 43 Cortes transversales a vistas a 40X y100X, mostrando transición, contorno de las traqueidas y canales resiníferos

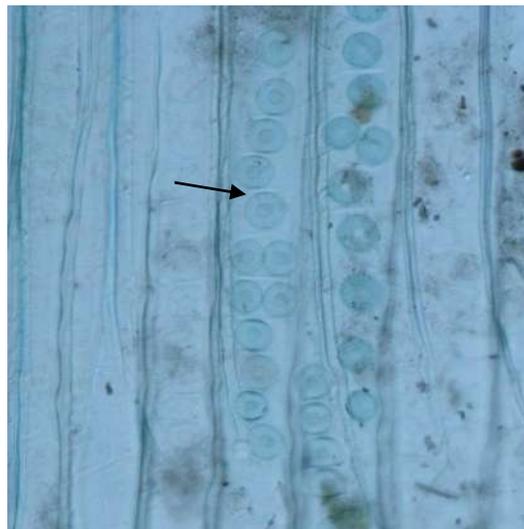


Figura 7. 44 Traqueidas con puntuaciones areoladas en 1 y 2 hileras vistas a 400X

Los **Radios** son de composición homogénea y heterogénea de tipo uniseriados y fusiformes. Los uniseriados en promedio presentan 9 células de alto, encontrándose también de 3-16. La altura de los radios fusiformes es de 237 μm en promedio (200 μm – 294 μm) y ancho promedio de 39 μm (34 μm - 47 μm). La abundancia de radios por mm lineal en promedio es de 5 (3 a 6). Los radios fusiformes presentan canales resiníferos con ancho promedio de 45 μm , (Figura 7.45).

Los **campos de cruzamiento** presentan puntuaciones pequeñas de 1-3 de tipo pinoide con reborde.

En la madera se observó la presencia de parénquima leñoso rodeando a algunos canales resiníferos y también hifas de hongos en parénquima radial y traqueidas axiales, (Figura 7.46).

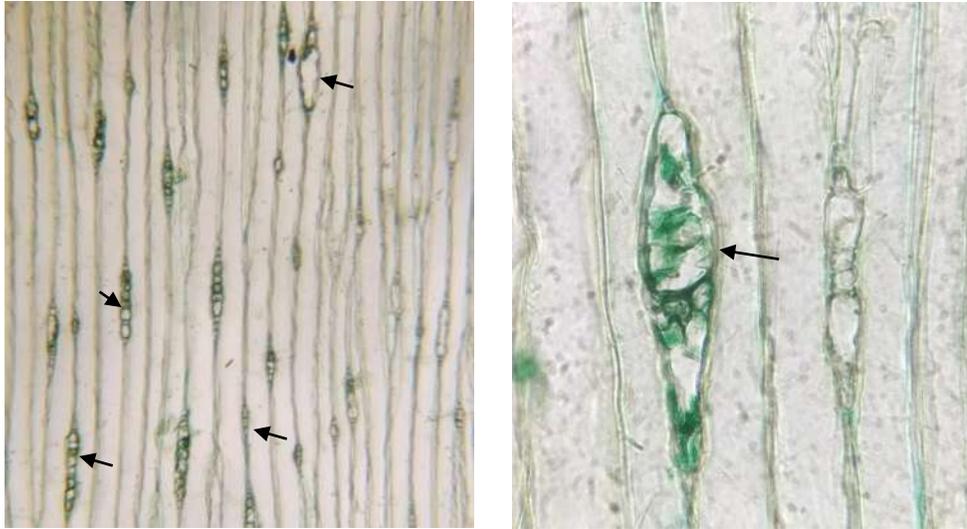


Figura 7. 45 Cortes tangenciales vistos a 100X y 400X, mostrando radios uniseriados y radios fusiformes

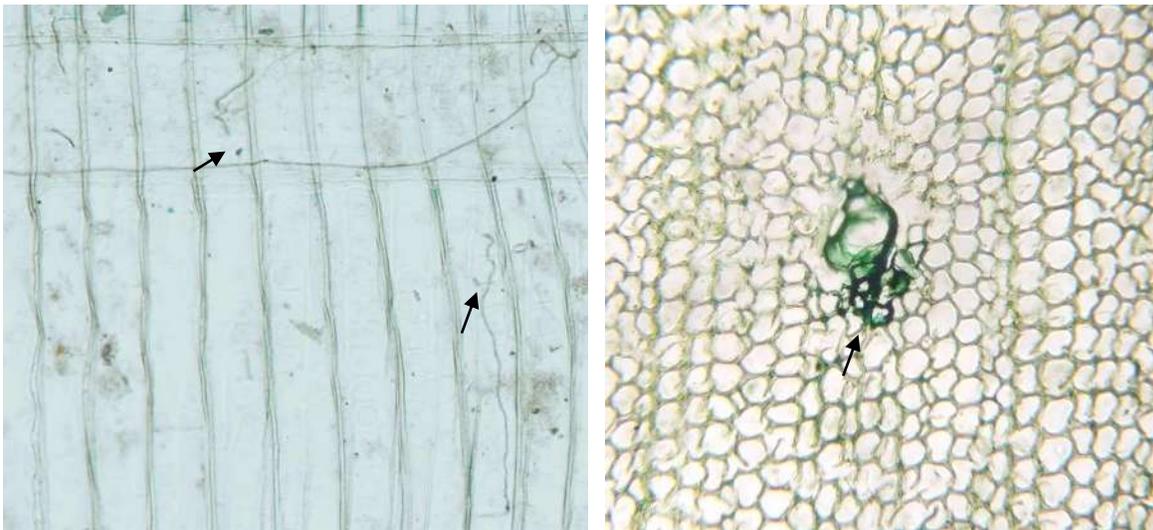


Figura 7. 46 Corte radial mostrando hifas en parénquima radial y traqueidas axiales (Izquierda), parénquima leñoso cercano al canal resinífero

8 Metodología

Se trabajó con madera de pino proveniente de vigería antigua, las cuales estuvieron en uso en un edificio histórico y con madera sana de *Pinus pseudostrobus* L; (esta última no sufrida deformaciones físicas causadas por esfuerzos mecánicos ni ataques biológicos) siendo considerado como nuestro testigo. Para los tres tipos de material (madera sana, viga 1 y viga 2) se seleccionaron las áreas adecuadas para la obtención de probetas y se efectuó su identificación y clasificación.

El tamaño de muestra fue determinado por dos factores principalmente, el tipo de transductores empleados para la medición y por lineamientos dados por el organismo regulador en sitios y monumentos históricos (INAH), ya que se pretende sea empleado en casos reales.

Las probetas empleadas en este estudio en un principio fueron de forma cilíndrica en el caso de las muestras de las vigas 1 y 2 y de forma cubica en el caso de las muestras sanas. Las de forma cilíndrica provienen de la vigería antes mencionada (se lijaron para poder identificar mejor sus diferentes caras, hasta obtener un cubo). Las dimensiones de los cilindros son de 32 mm de diámetro por 21mm de alto, como se muestra en la figura 8. 1. Las cuales fueron obtenidas usando un taladro percutor Black and decker 500 w $\frac{3}{4}$ ", con la ayuda de una sierra de perforación bimetálicas Milwaukee de $1\frac{1}{4}$ ".

Debido a la falta de superficies paralelas en los cilindros de madera deteriorada, se lijaron para restaurar las superficies reflectantes paralelas y formar cubos. El proceso de lijado se realizó con cuidado debido a la naturaleza frágil de los cubos. También 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.



Figura 8. 1 Probetas de madera deteriorada empleadas

Las probetas de madera sana (como se designó a las provenientes de madera no sometida a esfuerzos de cargas y sin daños biológicos), son de forma rectangular y cuentan con las siguientes dimensiones, 32 mm de largo por 24 mm de ancho y 35 mm de alto, como se muestra en la figura 8.2.



Figura 8. 2 Probetas de madera sana empleadas

Se efectuó su identificación, clasificación y orientación para cada una de las probetas, en cada uno de los casos. Teniendo en cuenta que las mediciones del estudio se realizarían en las tres direcciones principales de la madera, como se muestra en la figura 8. 6.

Se determinó la velocidad ultrasónica y la atenuación ultrasónica, esto con la finalidad de obtener el Módulo de Young y de Cortante de las distintas muestras de madera (Kránitz, 2013; Echenique, 1993).

Las mediciones se tomaron en las direcciones longitudinal, radial y tangencial para todas las muestras que usan transductores longitudinales y de corte. Las velocidades medidas fueron LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR, 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 se midieron en las nueve direcciones ya mencionadas. Las mediciones de corte (LR, LT, RL, RT, TL, TR) se ejecutaron alineando cuidadosamente los transductores de modo que la polarización.

Las características anatómicas de la madera representan un factor importante a considerar en ese estudio. La técnica de ultrasonido es capaz de registrar las pequeñas anomalías de los materiales, gracias a su umbral de detección.

Se efectuaron estudios anatómicos de las maderas de este estudio con la finalidad de poder observar más de cerca las condiciones físicas de los tres materiales, se realizaron pruebas destructivas, pero de poco impacto en las maderas (al ser a una escala mucho menor que las muestras de ultrasonido y muy pequeñas en relación con las dimensiones de la vigería estudiada); que nos permitieron conocer las características y condiciones físicas en las que se encuentran los tres tipos de maderas para este estudio (ver figura 8.3).

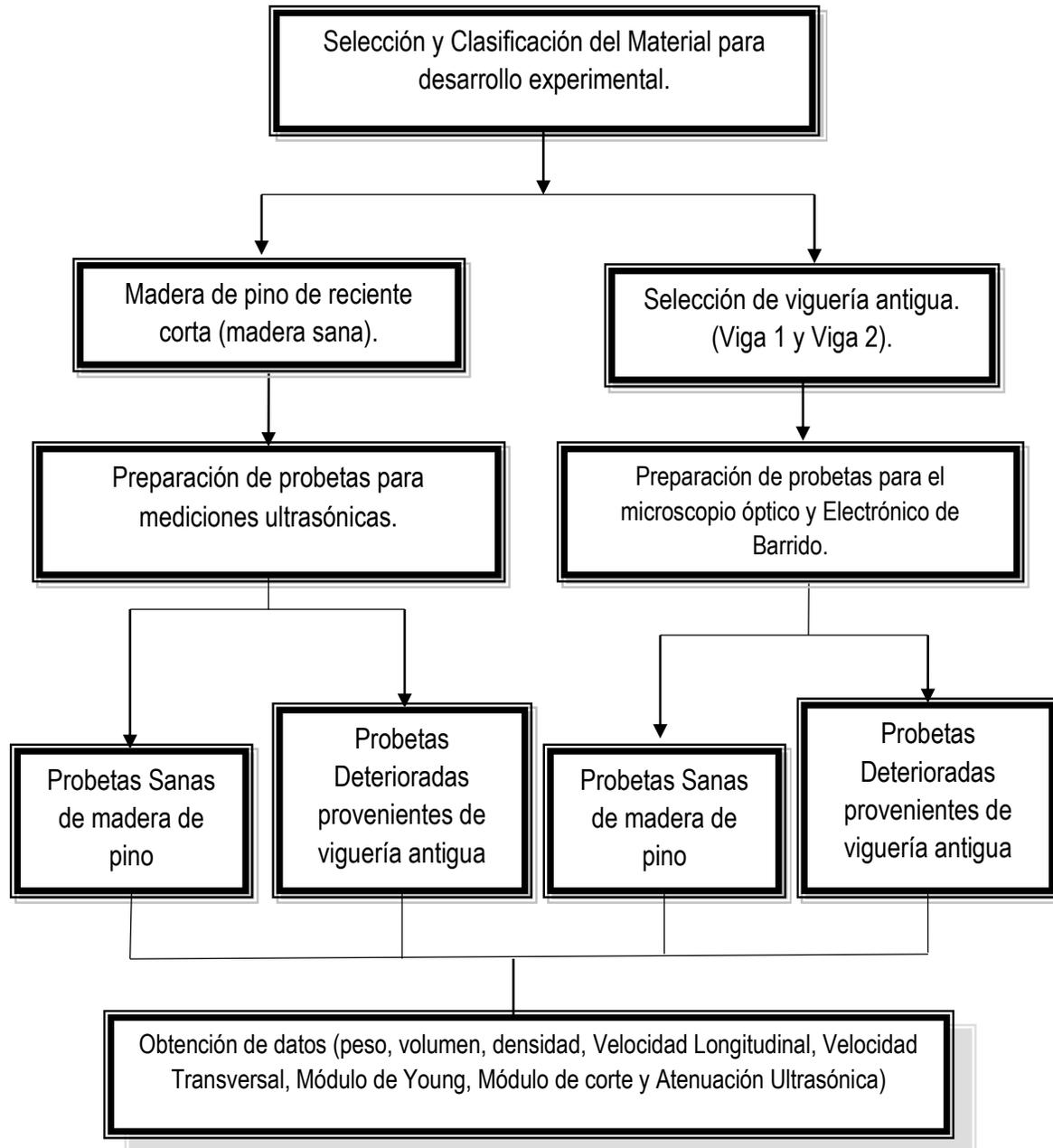


Figura 8. 3 Diagrama de Flujo de la metodología experimental

El diagrama 8.4, muestra el criterio empleado para la realización de las mediciones de ultrasonido. En este diagrama podemos observar cómo se midieron las muestras de madera sana, las muestras de madera de la viga 1 y de la viga 2, empleando dos tipos de frecuencias emitidas por los dos tipos de transductores. Obteniendo la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el Módulo de corte y la Atenuación Ultrasónica para cada uno de los materiales

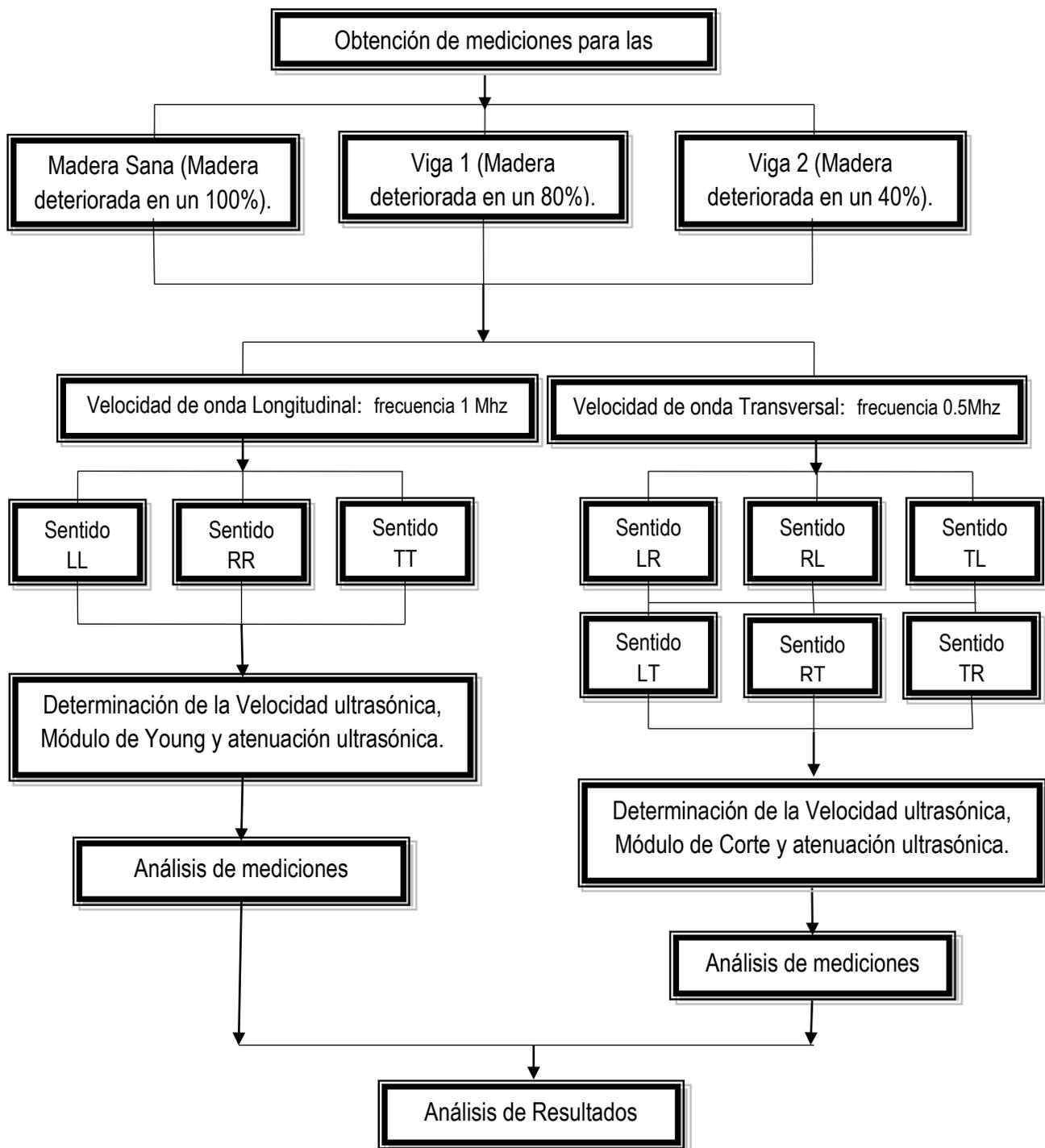


Figura 8. 4 Diagrama de Flujo de la metodología experimental

Apoyándonos en el microscopio electrónico de barrido y en el material disociado de las maderas. En la figura 8.5 se muestra el diagrama de flujo, que corresponde a la secuencia del desarrollo experimental, que se llevó a cabo para realizar el presente trabajo. El diagrama está dividido en tres partes, la primera muestra la selección de los tres tipos de madera y su división para las mediciones de ultrasonido y las muestras para el microscopio.

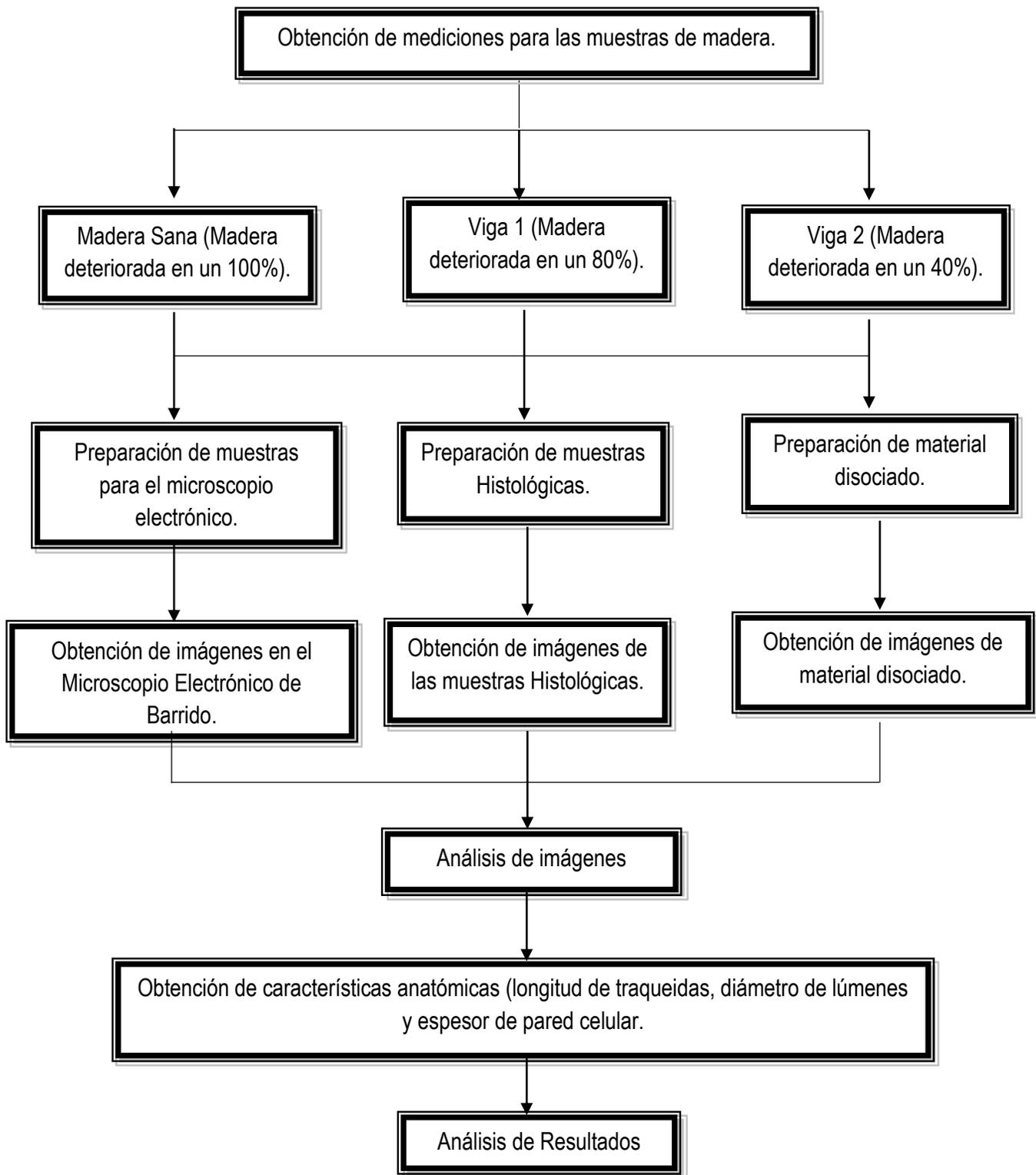


Figura 8. 5 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera

Se determinó la velocidad ultrasónica y la atenuación ultrasónica, esto con la finalidad de obtener las constantes elásticas de la madera y microestructura de esta. Se realizaron mediciones de la velocidad ultrasónica, en cada probeta cortada de diferentes secciones de la viga como se muestra la figura 8. 6, por medio de la técnica de contacto (inspección emisión-transmisión) utilizando un par de transductores de onda longitudinal: V103 frecuencia 1.0Mhz y diámetro elemento piezoeléctrico de 12.7 mm (ver figura 8.10 A) y un par de transductores de onda transversal: V151 frecuencia 0.5Mhz y diámetro elemento piezoeléctrico de 25.4 mm (ver figura 8.10 B), con el propósito de observar el comportamiento que tiene la onda ultrasónica dilatacional y corte con respecto a la diferentes secciones de la viga y de las muestras sanas (Chen, 2013).

En la figura 8.6 se muestran los esquemas del procedimiento que se realizó para la medición de las probetas de madera sana y deteriorada, con los Transductores de onda longitudinal V 103 frecuencia 1.0Mhz

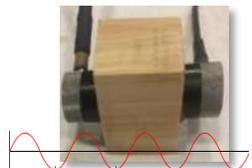
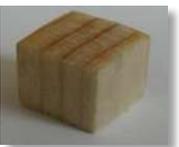
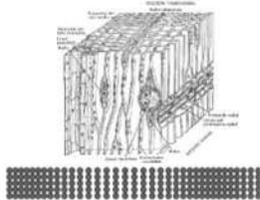
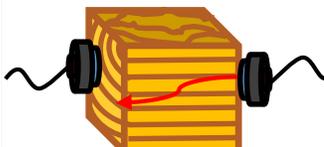
<p>Medición con Transductores de Onda Longitudinal V103 frecuencia 1.0 Mhz</p> 	<p><u>Muestras reales Madera Sana.</u></p> 	<p><u>Muestras reales obtenidas de las vigas 1 y 2.</u></p> 	<p><u>Muestras reales lijadas para una mejor identificación de sus caras.</u></p> 
<p>Estructura microscópica de la madera</p> 	<p>Medición sentido <u>Longitudinal LL 0°</u> (onda longitudinal V 103).</p> 	<p>Medición sentido <u>Radial RR 0°</u> (onda longitudinal V 103).</p> 	<p>Medición sentido <u>Tangencial TT 0°</u> (onda longitudinal V 103).</p> 

Figura 8. 6 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera

En el diagrama 8.7 se muestra como interactúa la señal de los transductores con la madera de las muestras (ver figura 8.7).

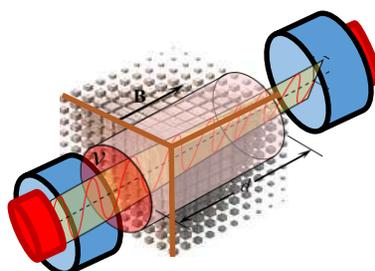
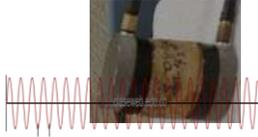
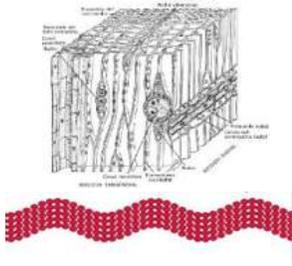
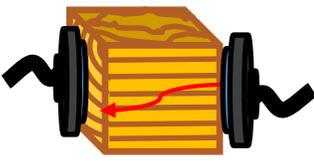
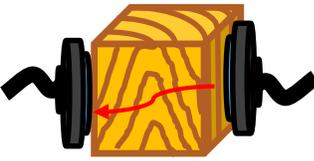
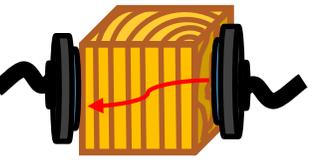
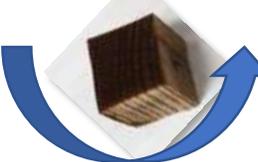
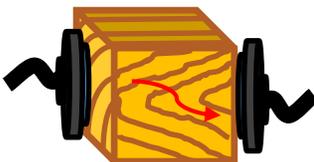
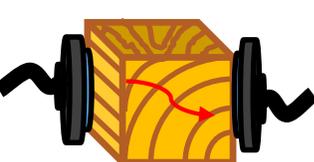
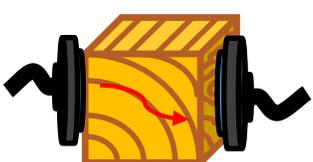


Figura 8. 7 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las ondas longitudinales y transversales

En la figura 8.8 se muestran los esquemas del procedimiento que se realizó para la medición de las probetas de madera sana y deteriorada, con los transductores de onda transversal: V 151 frecuencia 0.5Mhz.

Figura 8. 8 Dibujos esquemáticos de las formas de medición de las muestras y la estructura microscópica de la madera

<p>Medición Transductores de Onda Transversal: V151 frecuencia 0.5Mhz.</p> 	<p>Mediciones reales utilizando la <u>Onda Transversal</u></p> 	<p>Secciones caras de las vigas 1 y viga 2</p> 	<p>Estructura microscópica de la madera</p> 
<p>Muestras reales para <u>medición</u> de los sentidos mixtos a 0°.</p> 	<p>Medición sentido <u>Longitudinal Radial LR</u> 0° (onda transversal V 151).</p> 	<p>Medición sentido <u>Radial Tangencial RT</u> 0° (onda transversal V 151).</p> 	<p>Medición sentido <u>Tangencial Radial TR</u> 0° (onda transversal V 151).</p> 
<p><u>Rotación</u> de las Muestras reales para <u>medición</u> de los sentidos mixtos a 90°.</p> 	<p>Medición sentido <u>Longitudinal Tangencial LT</u> 90° (onda transversal V 151).</p> 	<p>Medición sentido <u>Radial Longitudinal RL</u> 90° (onda transversal V 151).</p> 	<p>Medición sentido <u>Tangencial Longitudinal TL</u> 90° (onda transversal V 151).</p> 

8. 1. Equipo de Ultrasonido para la técnica de contacto

A continuación, se muestra un esquema del Equipo de Ultrasonido que se emplea para los ensayos Ultrasonicos. Se utilizó 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 8.9.

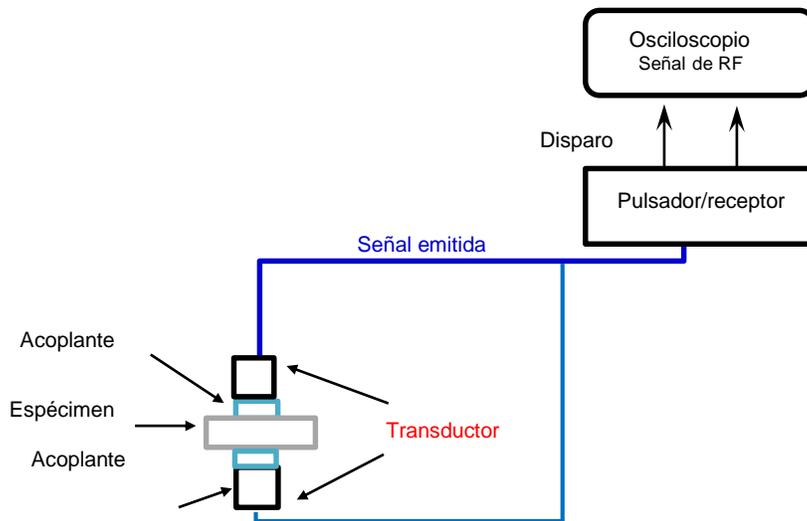


Figura 8. 9 Esquema de Equipo de medición de Ultrasonido

8.1.1 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 8.10.



Figura 8. 10 Pulsar/Receiver Modelo Panametrics

8.1. 2 Osciloscopio HP digital

En este 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. 11 se muestra el Osciloscopio utilizado.

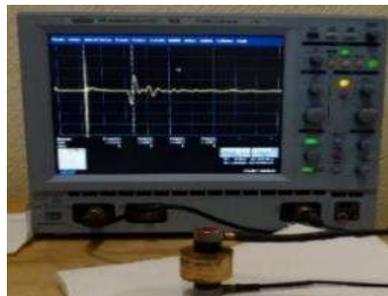


Figura 8. 11 Osciloscopio HP digital

8.1.3 Transductor

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 8.12.



Figura 8. 12 (A) Transductores de onda longitudinal V103 frecuencia 1.0Mhz y (B)transductores de onda transversal: V151 frecuencia 0.5Mhz

8.1.4 Adquisición de señales Ultrasónicas

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 8.13 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. Equipos de tecnología de punta tienen capacidad interna de procesamiento de tal forma que el análisis de Fourier puede ser realizado sin necesidad de una computadora (Sandoz, 1991).

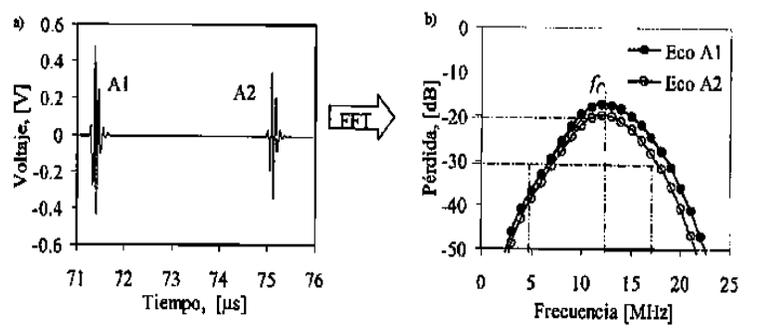


Figura 8. 13 (A)Transformación de un pulso en el dominio del tiempo (B) al dominio de la frecuencia

8.1.5 Velocidad ultrasónica

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 (Katalin Kránitz, 2013).

La madera es considerada un material orto trópico 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:

$$R_{ii} = C_{ii}^2 \cdot \rho$$

Ecuación 16. 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:

$$E_{ii} \approx R_{ii}$$

Ecuación 17. Aproximación el módulo de Young a los valores de rigidez.

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

$$G_{ij} = C_{ij}^2 \cdot \rho$$

Ecuación 18. 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.

8.1.6 Atenuación ultrasónica

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:

$$\alpha = \frac{20}{d} \log \frac{A_2}{A_1}$$

Ecuación 19. 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.

8.1.7. Descripción microscópica de la madera

Para la descripción microscópica se realizaron preparaciones de cubos, preparaciones fijas y material disociado a partir de cubos de 2 x 2 x 2 cm, obtenidos de las caras de las vigas 1 y 2 secciones 1,5, 3 y 4 (Ver figuras punto B 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17). Los cubos presentan caras en cortes Longitudinal Radial, Longitudinal Tangencial y Trasversal, (no deben ser de albura ni de madera próxima a la medula). Los cubos se sometieron a un proceso de ablandamiento por medio de ebullición a presión atmosférica y glicerina para realizar los cortes.

8.1.7.1 Preparación de muestras para microscopio Electrónico de Barrido

Las muestras para el Microscopio Electrónico de Barrido fueron cortadas con las siguientes dimensiones; 8mm X 8mm X 8mm. Como la muestra es orgánica no conductora, primero se limpiaron cuidadosamente las muestras las cuales deben de estar secas y ser conductoras de electricidad. Para esto se recubrieron con una capa de material conductor metálico mediante la técnica del Sputtering (pulverización catódica). 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 8.14. Para pegar la muestra a la montura se utilizaron cintas de carbón y cintas de cobre.



Figura 8. 14 Montura de aleación de Aluminio y muestras

8.1.7.2 Preparación de muestras Histológicas.

Las preparaciones fijas con cortes típicos (Longitudinal Radial, Longitudinal Tangencial y Trasversal) se obtuvieron a partir de los cubos ablandado, con la ayuda de un micrótopo de deslizamiento marca Leitz, el grosor de estos cortes presento una variación de 20 a 30 micras. (Ver figura 8.15). Los cortes obtenidos se blanquearon con cuatro partes de agua y una quinta parte de hipoclorito de sodio por un tiempo de 10 minutos; dicho proceso tiene la finalidad de eliminar el color natural y los extraíbles de la madera y lograr una mejor fijación del tinte.

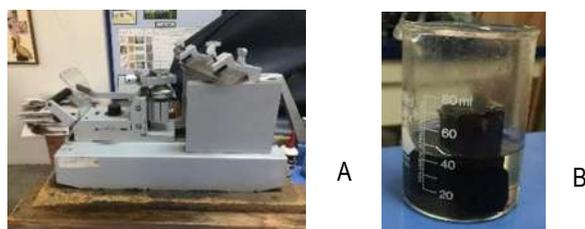


Figura 8. 15 (A) Micrótopo para corte de muestras, (B) muestras para corte

Posteriormente se lavaron los cortes cuatro veces con agua destilada para eliminar el residuo de blanqueador y se tiñeron de Verde Yodo por un tiempo de 12 horas, posteriormente se lavaron con alcohol al 60% de 3-5 veces hasta eliminar los residuos del colorante. Se eliminaron los residuos de colorantes y se prosiguió a la deshidratación en alcoholes de concentración gradual; alcohol al 70% por 1 hora, alcohol al 80% por 1 hora, alcohol al 96% por 1 hora y finalmente alcohol al 100% por 5 minutos; pasado este tiempo se aclararon con xilol por 1 minuto.

Terminado este proceso los cortes fueron montados en un portaobjetos de izquierda a derecha, colocando el corte radial, trasversal y tangencial, cubriéndolos con resina sintética y un cubreobjetos, formando las preparaciones fijas. Dejando que se secan durante 15 días, y posteriormente retirar el exceso de resina, (ver figura 8.16). Las figuras 8.17, 8.18, y 8.19 muestran imágenes de las vigas 1 y 2, y de la madera sana de las muestras histológicas

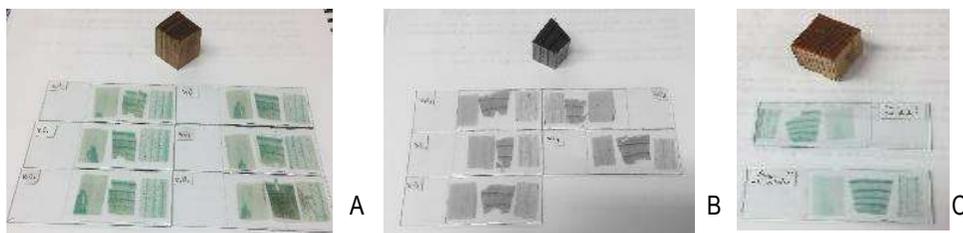


Figura 8. 16 (A) Muestras viga 1, (B) muestras viga 2, (C) muestras madera sana

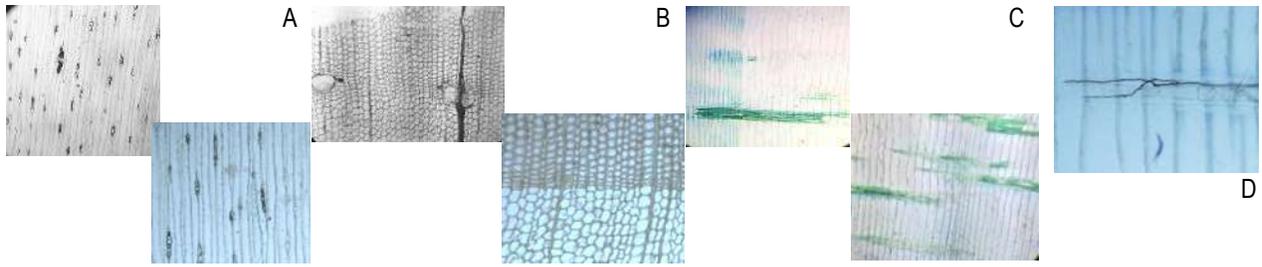


Figura 8. 17 Muestras viga 1 a 4x y 10x (A) corte tangencial, (B) corte transversal, (C) corte radial, (D) corte tangencial

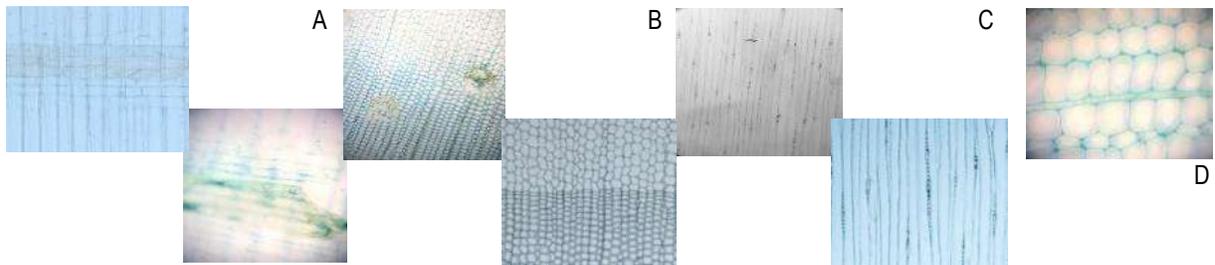


Figura 8. 18 Muestras viga 2 a 4x y 10x (A) corte radial, (B) corte transversal, (C) corte tangencial, (D) corte tangencial donde se aprecian los hongos existentes en la madera

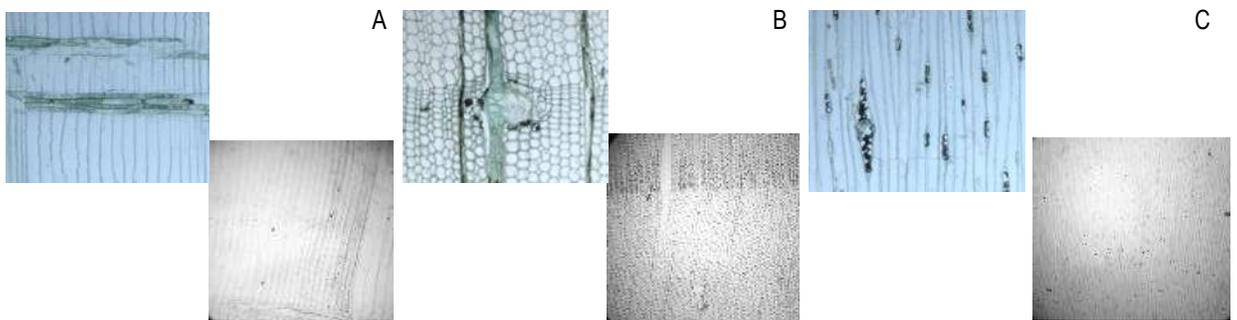


Figura 8. 19 Muestras sanas a 4x y 10x (A) corte tangencial, (B) corte transversal, (C) corte radial, (D) corte tangencial

8.1.7.3 Preparación del material disociado.

Para realizar la disociación de la madera en el presente trabajo se utilizó el método de Franklin modificado por Rodríguez (Rodríguez V., 1998). Para la preparación de este material se obtuvieron pequeñas virutas de la cara radial de los cubos previamente ablandados, uno por cada viga y por el material sano, ver figura 8.20.

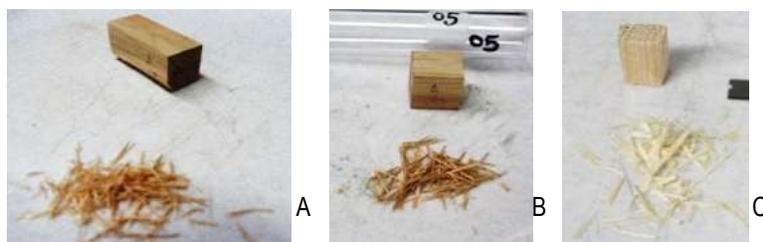


Figura 8. 20 (A) Muestras viga 1, (B) muestras viga 2, (C) muestras madera sana

Se colocaron cada uno de los 3 materiales en tres diferentes tubos de ensaye para cubrirlos con una mezcla disociadora compuesta. Para llevar a cabo la disociación de la madera, se hizo una mezcla de ácido glacial acético y peróxido de hidrógeno al 30% en proporción 1:1. (ver figura 8.21) A cada uno de los frasquitos se les agregó 4 ml de la solución anterior, posteriormente éstos se incubaron en la estufa por un periodo de 4 horas. Concluido el periodo de incubación, se observó que las muestras adquirieron un color amarillo debido que estas muestras contenían mucha resina.



Figura 8. 21 (A) ácidos empleados, (B) mezcla de ácidos, (C) colocación de la mezcla en las muestras

Es importante mencionar que en el proceso de disociación de la madera se observó que cuando las muestras se metían tapadas a la estufa éstas se tiraban debido a la presión del calor, por lo cual se decidió por tapar los frasquitos con papel aluminio con un agujero en la parte superior para evitar que las muestras se tiraran y además de que éstas se secaran al evaporarse. Se dejaron reposar a baño maría por un tiempo de 2 hora hasta el momento en que la mezcla comenzó a despedir gases color marrón y 35 minutos posteriores a la eliminación de los gases. Se retiraron del fuego para ser agitadas con la ayuda de una varilla de vidrio para observar la cantidad de material disociado. (ver figura 8.22).

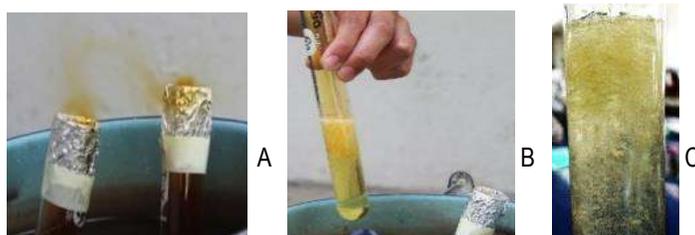


Figura 8. 22 (A) Cocción y expedición de gases, (B) agitación del material, (C) obtención de material disociado de las Muestras

Una vez obtenido el material se le coloco agua destilada para poder ser tamizado en una maya de nylon, proceso que se repitió cuatro veces con el fin de eliminar la mezcla de ácido, luego se agitaron fuertemente para obtener una mejor disociación de la madera y permitir que sea teñido.

8.1.7.4 Teñido de fibras

Una vez que el material se encontraba bien disociado, se procedió al teñido de las fibras con pardo de Bismark por 15 minutos. Pasado ese tiempo se retiró el exceso de colorante de 3 a 6 veces con alcohol al 60% eliminando todo el residuo del colorante. Una vez limpio es colocado en una caja de Petri con alcohol al 70%, (ver figura 8.23).

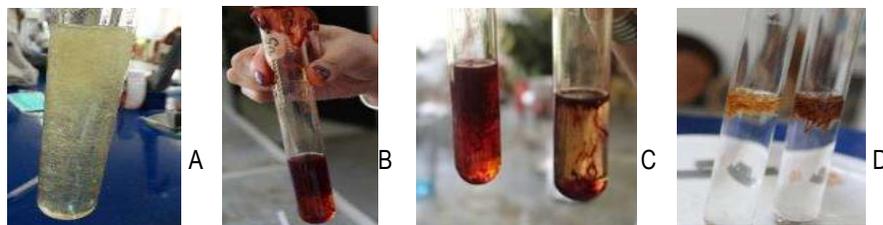


Figura 8. 1 (A) obtención de material disociado de las muestras, (B) material disociado con el tinte, (C) material libre de residuos del colorante.

8.1.7.5. Preparación de laminillas

Para llevar a cabo la preparación de las laminillas permanentes se utilizó un microscopio estereoscópico, en el que se colocó un portaobjetos y con un pincel se colocaron las células y se dispersaron en el portaobjetos para su deshidratación a temperatura ambiente durante 15 días para colocar la resina sintética y el cubreobjetos; se dejaron secar por otros 15 días más y se eliminan los excesos de resina. Finalmente, los portaobjetos fueron etiquetados con base a la información que cada frasquito contenía (ver figura 8.24).



Figura 8. 23 (A) obtención de material disociado de las muestras, (B) material disociado con el tinte colocado en el cubreobjetos

8.1.8. Determinación de abundancia y tamaño de los elementos estructurales

Se utilizó un microscopio óptico marca Iroscope, con ocular micrométrico. Se realizaron 100 mediciones de cada uno de los elementos para cada una de las 3 muestras. En el presente trabajo se midió el ancho de traqueida (A.T), el ancho del lumen (A.L) y el grosor de la pared celular (G.P) que corresponden a las dimensiones transversales de las traqueidas. Para realizar las mediciones se utilizó el microscopio, el cual fue previamente calibrado, con objetivo de 40 X, ya que con éste se observó con mejor claridad cada una de las características a evaluar, además de que se tiene mejor precisión en las mediciones.

Dichas mediciones se hicieron con una reglilla graduada sin unidades y para convertirlas a micras sólo se multiplicó 2.5μ por el número de líneas observadas en la reglilla. Cabe mencionar que el 2.5μ fue un factor que resultó de la calibración del microscopio con el objetivo de 40 X (ver figura 8.25).

De las mediciones se obtuvieron los valores promedio de cada uno de los elementos de cada variable y de los índices de calidad de pulpa: Coeficiente de rigidez (C.R.), Coeficiente de flexibilidad (C.F.) y Relación Runkel (R.R.). Esto con la aplicación de las fórmulas (Petroff, 1968; Fuentes, 1990 y Villaseñor, 2000).

$$C.R. = \frac{2w}{D}$$

$$C.F. = \frac{I}{D}$$

Ecuación 20. Coeficiente o índice de rigidez.

Ecuación 21. Coeficiente de flexibilidad

$$I.E. = \frac{L}{D}$$

Ecuación 22. Coeficiente de Peteri o índices de esbeltez

$$R.R. = \frac{2w}{I}$$

Ecuación 23. Relación Runkel

Donde; D = diámetro de Traqueida

L= longitud de Traqueida

I=diámetro de lumen

2w= grosor de las paredes de las traqueidas

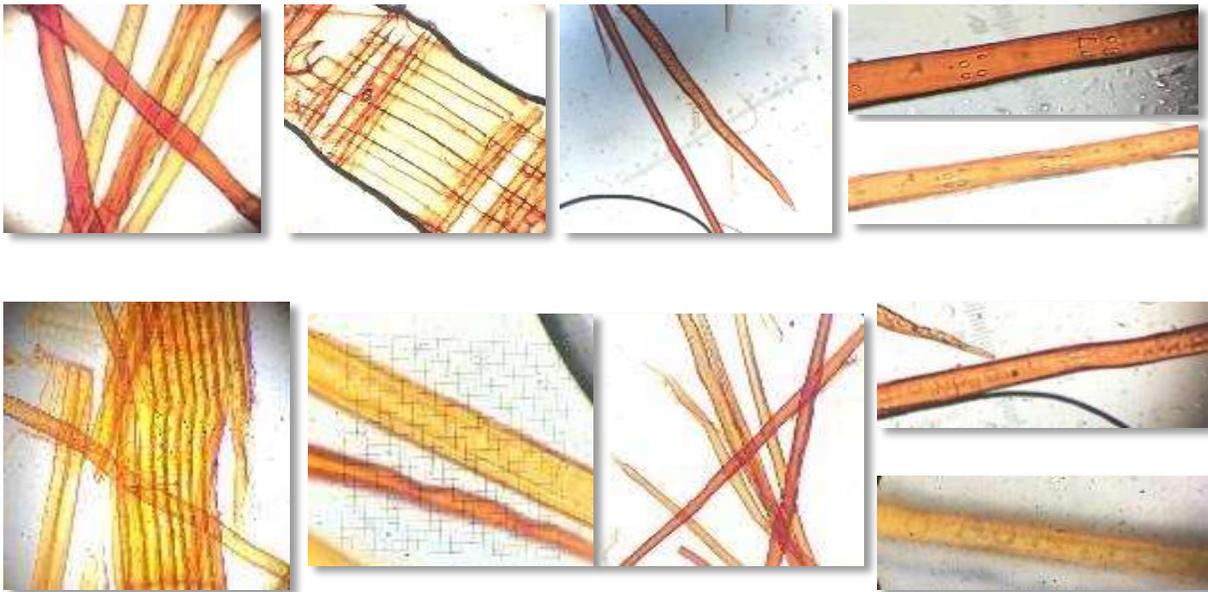


Figura 8. 24 Imágenes microscópicas de las muestras de madera sana y deterioradas

9. Resultados

9.1 Descripción de la metodología del análisis estadístico de los resultados de las mediciones

Las muestras de madera sana se encontraron en óptimas condiciones esta madera está en un 100%, las muestras de la viga 1 nos arrojan resultados con los cuales se determinó que estas muestras presentan un deterioro de un 20% en relación con la madera sana (se consideró que la viga 1 está en un 80% sana en relación con la madera sana). Las muestras de la viga 2 indican que esta madera está deteriorada en un 60% en relación con la madera sana (la viga 2 se consideró que esta en un 40% sana en relación con la madera sana). Así que las nombraremos como Madera sana (100%), viga 1 (80%) y viga 2 (40%).

Las mediciones efectuadas por medio de la técnica de contacto (inspección emisión-transmisión), con dos los tipos de ondas longitudinal y onda transversal utilizando dos pares de transductores (onda longitudinal V103 a una de frecuencia 1.0Mhz y diámetro elemento piezoeléctrico de 12.7 mm y onda transversal V151 a una frecuencia de 0.5Mhz y diámetro elemento piezoeléctrico de 25.4 mm), realizadas con el propósito de observar el comportamiento que tiene la onda ultrasónica dilatacional y de corte con respecto a las diferentes muestras de madera sana, viga 1 y viga 2. Con el fin de obtener los valores de la Velocidad Longitudinal, la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el Módulo de Corte y la Atenuación ultrasónica para la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal.

Los sentidos de medición para todas las muestras con la onda longitudinal fueron LL, RR y TT, donde el primer subíndice indica la dirección de propagación de la onda ultrasónica y el segundo subíndice denota su polarización; para la dirección de propagación de la onda transversal los sentidos de medición para todas las muestras fueron LR, LT, RL, RT, TL, y TR.

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran a continuación en gráficas y tablas en las cuales se observan las diferencias y similitudes de estos resultados. Para el análisis de datos de manera estadística, se realizó un Análisis de varianza de un factor (prueba de ANOVA) entre las variables cuantitativas como son la Velocidad Longitudinal, la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el Módulo de Corte y la Atenuación ultrasónica para la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal, para cada uno de los sentidos de medición LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR, con un nivel de significancia de un 95%; para realizar el análisis y la comparación entre datos de medición, para cada uno de los tres grupos de muestras de madera (sana, viga1 y viga2) en cada uno de los sentidos de medición mencionadas anteriormente.

La Hipótesis Nula menciona que todas las mediciones de cada uno de los sentidos de la madera donde se efectuaron las pruebas de ultrasonido con cualquiera de las dos velocidades son iguales, con un 95% de confiabilidad.

La Hipótesis Alterna menciona que, en al menos en una de las dos velocidades, al menos en uno de los sentidos de medición el valor de la media es distinta para la Velocidad Longitudinal, la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el Módulo de Corte y la Atenuación ultrasónica para la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal y que en al menos en uno de los grupos de muestras (madera sana, viga 1 y viga 2) los datos anteriores son distintos y que en al menos uno de los sentidos de medición de la madera en alguno de los tres grupos es distinto con un 95% de confiabilidad.

Una vez identificadas las variables para el análisis, se calcularon los promedios de cada grupo para la variable para cada variable. Se cálculo del valor de F y ρ por medio de la prueba estadística ANOVA. Una vez que se calcularon estos valores respetando el nivel de significancia de 0.05 que nos dice que al obtener valores de ρ menores a este, nos indica que hay que rechaza la Hipótesis Nula, para todos los casos se rechazó esta hipótesis. Al rechaza la Hipótesis Nula nos quedamos con la Hipótesis Alterna, para poder identificar cual o cuales, de las variables, de los grupos y de los sentidos de medición es o son, el o los que es o son diferentes en relación con los otros, se empleó la prueba de Tukey, para todas las combinaciones se están escritas más adelante en este punto.

La prueba de Tukey nos permitió ver cual o cuales de estos grupos eran diferentes en relación con los otros, para poder saber de estas diferencias se obtuvo el valor de q_{α} (valores críticos de las tablas para la prueba de Tukey) mediante los grados libertad dentro de los grupos con un valor de significancia de 0 .05; el cuadrado del error medio obtenido de la división de la suma de cuadrados y los grados de libertad dentro de los grupos y el número de muestra de cada uno de los grupos; permitió calcular la diferencia de medias.

Las tablas realizadas en este apartado muestran los valores resultantes del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera sana, de la viga 1 y viga 2, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras en cada una de las velocidades, los módulos de elasticidad y de corte, así como la atenuación, en los nueve sentidos de medición para cada uno de los tipos de madera (sana, viga 1 y viga 2). Efectuando este análisis para los datos presentados en este apartado de las tres maderas. Las tablas muestran el tipo de madera (sana, de la viga 1 y viga 2) los sentidos de medición y las variables en filas y en columnas. Calculando la media aritmética de cada uno de los grupos de datos, utilizando la suma de cuadrados y los grados de libertad dentro de los grupos empleando la diferencia de medias; fue posible establecer cuales grupos eran diferentes entre ellos y en cuales no existía una diferencia significativa, en las distintas combinaciones de datos.

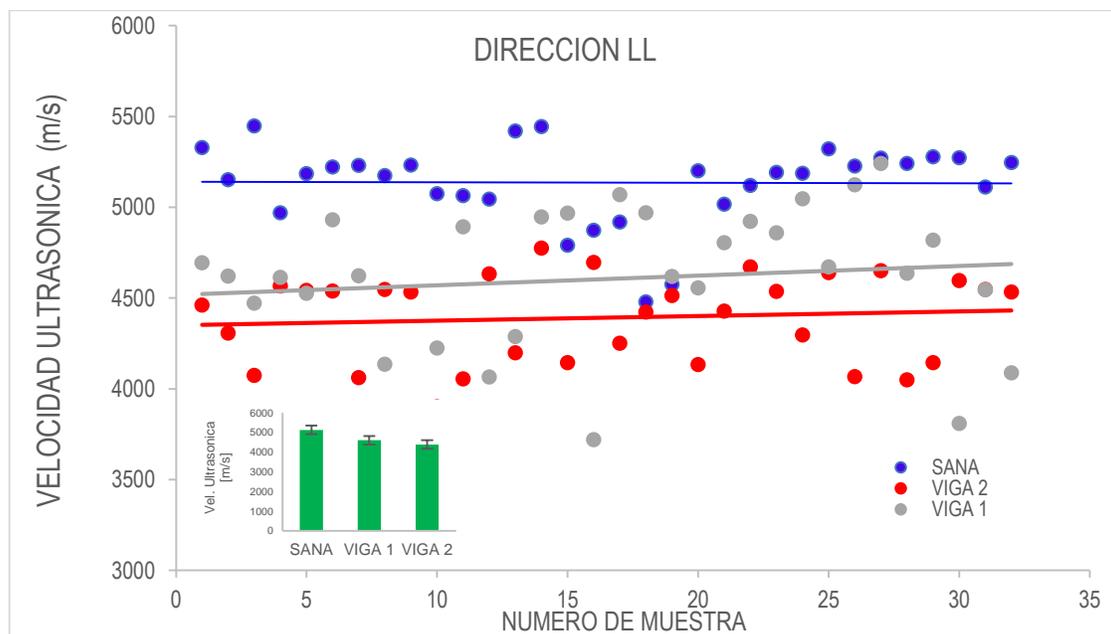
Se resto el promedio de la media aritmética entre los grupos y se identificó cuáles son los que sobre pasan al valor de la diferencia de medias, marcando en color gris los valores de las tablas que sobre pasan el valor de la diferencia de medias (indicando en una tabla que se presenta antes de esta), si es que existe una diferencia entre estos dos grupos, en las diferentes combinaciones.

9. 1. 1 Velocidad de onda Longitudinal.

Las gráficas siguientes presentan los valores totales de las 35 mediciones (35 muestras por cada tipo de madera) efectuadas para cada tipo de muestra en cada uno de sus sentidos (longitudinal, radial y tangencial). Se muestran las gráficas de resultados de Velocidad longitudinal, Velocidad transversal, Módulo de Young, Módulo de corte y la Atenuación ultrasónica, para cada uno de los nueve sentidos para los tres tipos de muestras. Y sus valores de F, valor de ρ y prueba de diferencia de medias en tablas y las tablas de datos de las posibles relaciones entre ellas.

9.1.1.1. Grafica de resultados para la Velocidad longitudinal, para los tres tipos de muestras en la dirección longitudinal de la madera (LL).

La siguiente grafica muestra como la velocidad longitudinal en el sentido longitudinal de las muestras de madera (LL); tiene valores más altos en la madera sana y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.1).



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	5135.45	4604.72	4391.91
Desviación Estándar	220.97	401.38	241.13

Figura 9. 1 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad longitudinal en el sentido LL, (ver figura 9.2).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
52.51	5.45985E-16	194.99

Figura 9. 2 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.

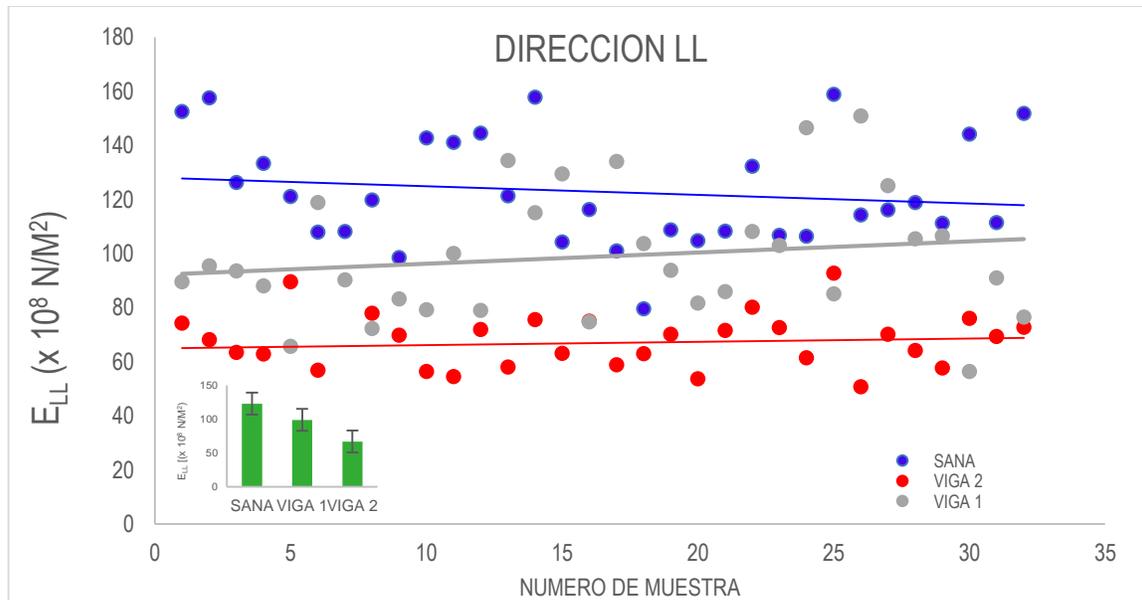
La siguiente tabla se muestran en color gris los valores que indican como existen diferencias significativas en todas las caras de las muestras sana, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido LL con la velocidad longitudinal (ver figura 9.3).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido LL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		530.73	743.55
Viga 1(80%)	-530.73		212.82
Viga 2 (40%)	-743.55	-212.82	

Figura 9. 3 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal.

9.1.1.2. Módulo de Young. Grafica de resultados del módulo de Young, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal (LL)

Los valores promedio del Módulo de Young, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en la dirección longitudinal (LL) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.4)



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	122.86	98.93	67.02
Desviación Estándar	20.28	23.25	11.11

Figura 9. 4 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de Young en el sentido LL, (ver figura 9.5).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
70.02	2.8104E-19	12.35

Figura 9. 5 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.

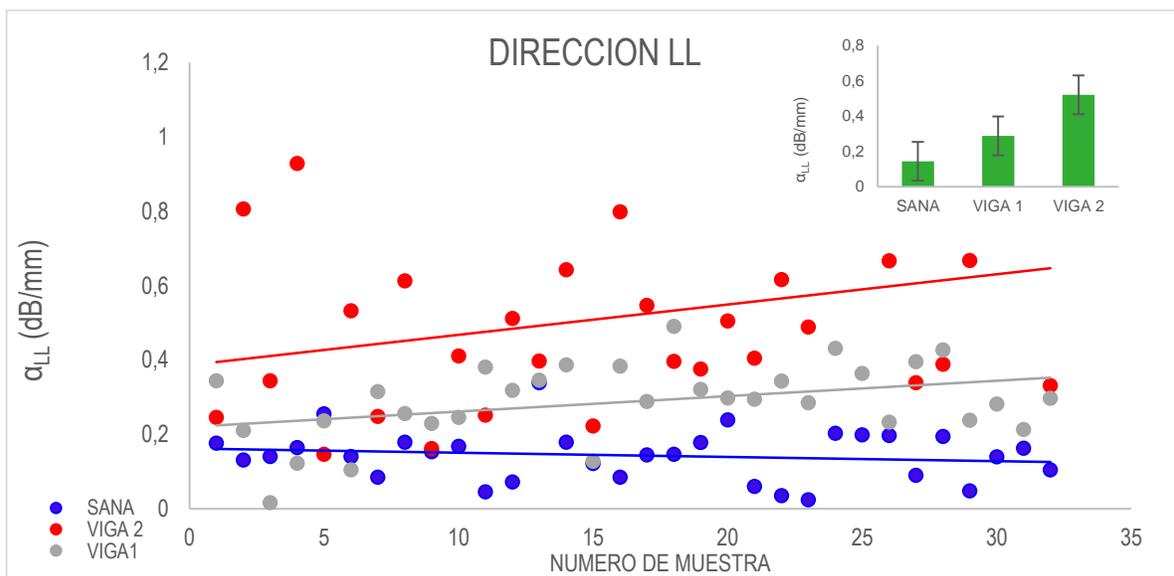
La siguiente tabla muestra como en el Módulo de Young existen diferencias significativas entre todas las muestras de madera sana, de la viga 1 y de la viga 2 en el sentido LL con la velocidad longitudinal (ver figura 9.6).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido LL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		23.92	55.83
Viga 1(80%)	31.91		31.91
Viga 2 (40%)	-55.83	-31.91	

Figura 9. 6 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young.

9.1.1.3. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal de la madera (LL).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor perdida en la madera sana (valores más bajos) y la perdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos) ver figura 9.7.



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.14	0.28	0.52
Desviación Estándar	0.06	0.10	0.24

Figura 9. 7 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal.

A continuación, se muestran los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación en el sentido LL, (ver figura 9.8).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
46.99	7.8682E-15	0.10

Figura 9. 8 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

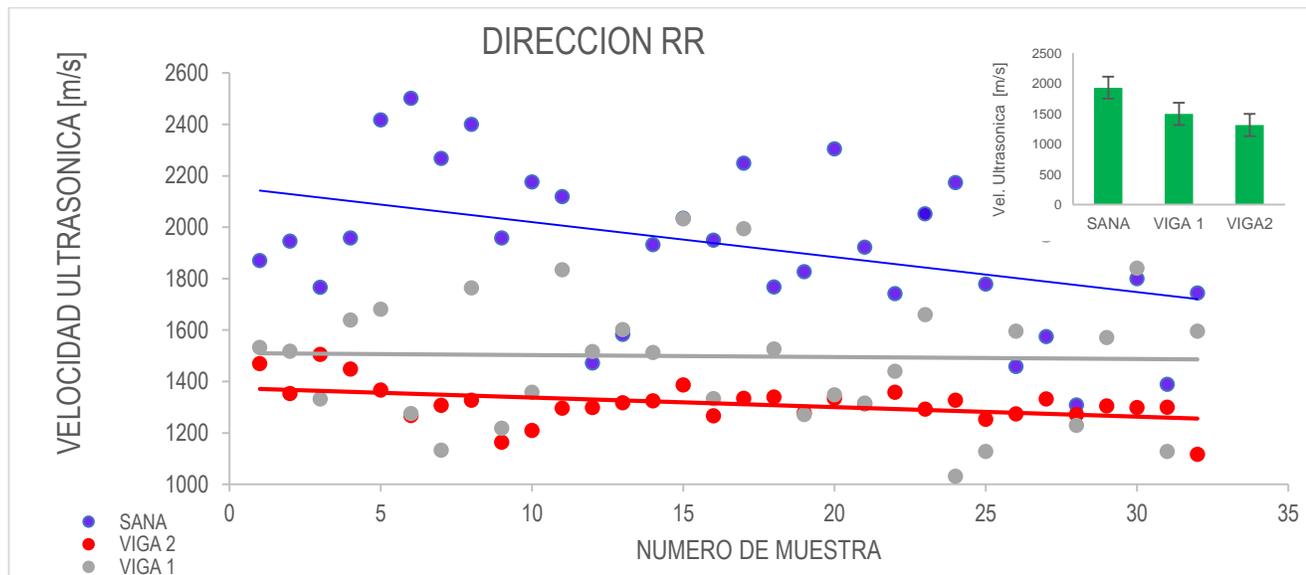
La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre todas las muestras de la madera sana, de la viga 1 y de la viga 2 en el sentido LL con la velocidad longitudinal (ver figura 9.9).

Correlación de la Atenuación en el sentido LL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.14	-0.38
Viga 1(80%)	0.14		-0.23
Viga 2 (40%)	0.38	0.23	

Figura 9. 9 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación

9.1.1.4. Grafica de resultados para la Velocidad longitudinal, para los tres tipos de muestras en la dirección radial de la madera (RR).

La siguiente grafica muestra como la Velocidad longitudinal, en el sentido radial de las muestras de madera (RR); tiene valores más altos en la madera sana y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia ver figura 9. 10.



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	1931.48	1497.46	1313.48
Desviación Estándar	313.91	265.31	76.10

Figura 9. 10 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad longitudinal en el sentido RR, (ver figura 9.11).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
55.32	1.4848E-16	157.42

Figura 9. 11 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2

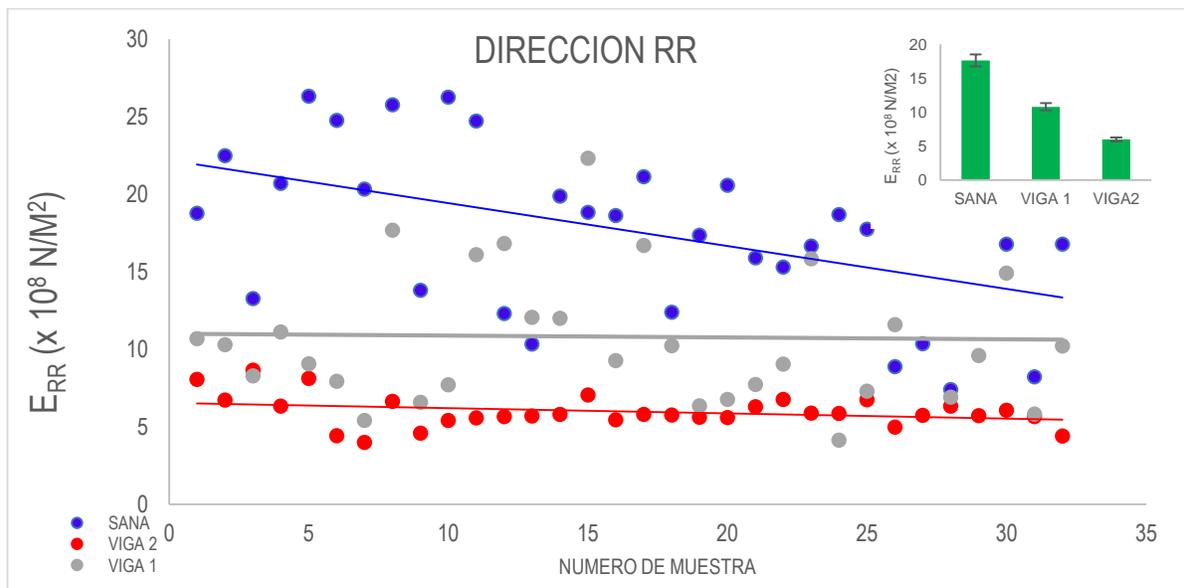
La siguiente tabla muestra como existen diferencias significativas entre todas las muestras de madera sana, de la viga 1 y de la viga 2 en el sentido RR con la velocidad longitudinal (ver figura 9.12).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido RR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		434.02	618.00
Viga 1(80%)	-434.02		183.98
Viga 2 (40%)	-618.00	-183.98	

Figura 9. 12 Resultados de la relación entre el sentido RR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal

9.1.1.5. Módulo de Young. Grafica de resultados del Módulo de Young, para los tres tipos de muestras en el sentido radial (RR).

Los valores promedio del Módulo de Young, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido radial de las muestras (RR) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.13).



Tipos de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	17.62	10.80	5.99
Desviación Estándar	5.34	4.45	1.03

Figura 9. 13 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de Young en el sentido RR, (ver figura 9.14).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
66.18	1.3369E-18	2.65

Figura 9. 14 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

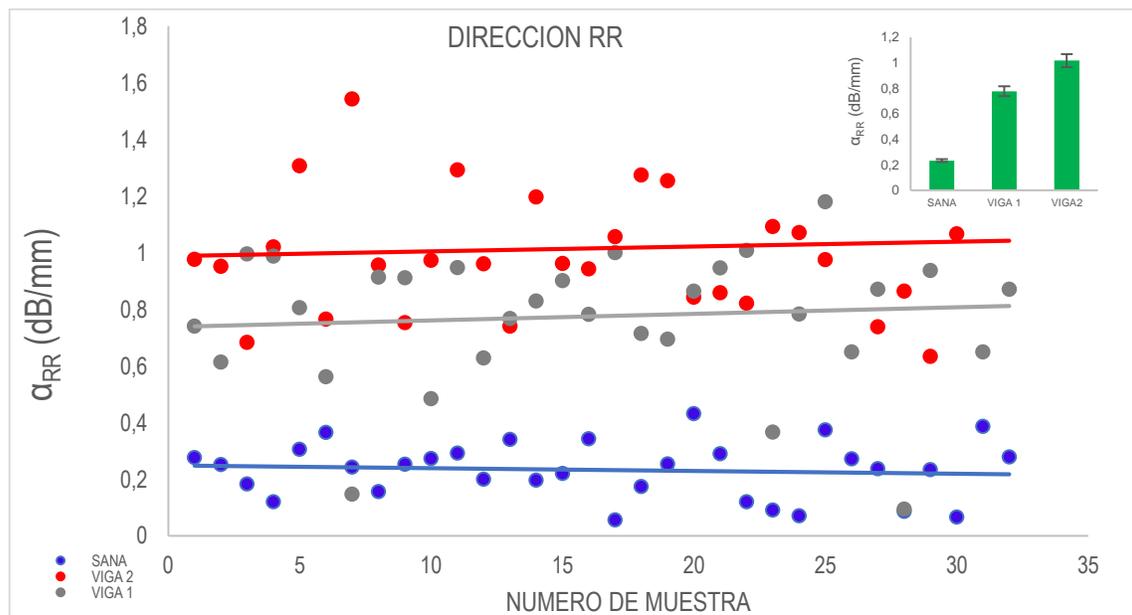
La siguiente tabla muestra como en el Módulo de Young existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido RR con la velocidad longitudinal (ver figura 9.15).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido RR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		6.82	11.63
Viga 1(80%)	4.81		4.81
Viga 2 (40%)	-11.63	-4.81	

Figura 9. 15 Resultados de la relación entre el sentido LL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young

9.1.1.6. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido radial de la madera (RR).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor perdida en la madera sana (valores más bajos) y la perdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos), ver figura 9.16.



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.23	0.77	1.01
Desviación Estándar	0.10	0.25	0.22

Figura 9. 16 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial

A continuación, se muestran los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación en el sentido RR, (ver figura 9.17).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
125.66	3.6741E-27	0.13

Figura 9. 17 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2

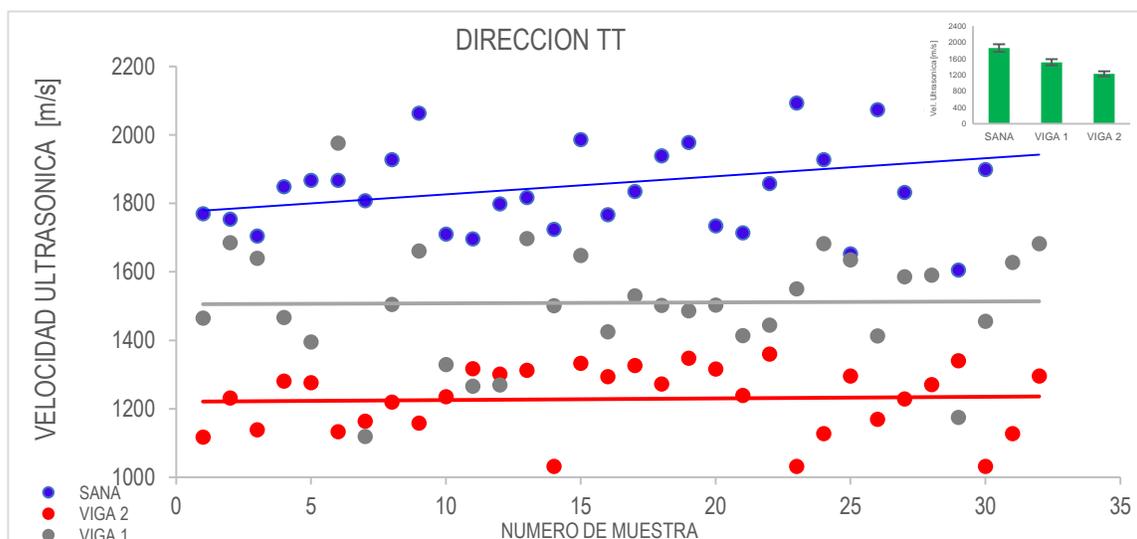
La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre todas las caras de las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido RR con la velocidad longitudinal (ver figura 9.18).

Correlación de la Atenuación en el sentido RR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.54	-0.78
Viga 1(80%)	0.54		-0.24
Viga 2 (40%)	0.78	0.24	

Figura 9. 18 Resultados de la relación entre el sentido RR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación

9.1.1.7. Grafica de resultados para la Velocidad longitudinal, para los tres tipos de muestras en la dirección tangencial de la madera (TT).

La siguiente grafica muestra como la Velocidad longitudinal (ver punto), en el sentido tangencial (ver punto) de las muestras de madera (TT); tiene valores más altos en la madera sana y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.19).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	1860.35	1509.91	1228.71
Desviación Estándar	142.72	171.39	97.22

Figura 9. 19 Resultados para la velocidad longitudinal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad longitudinal en el sentido LL, (ver figura 9.20).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
162.39	4.57922E-31	91.63

Figura 9. 20 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

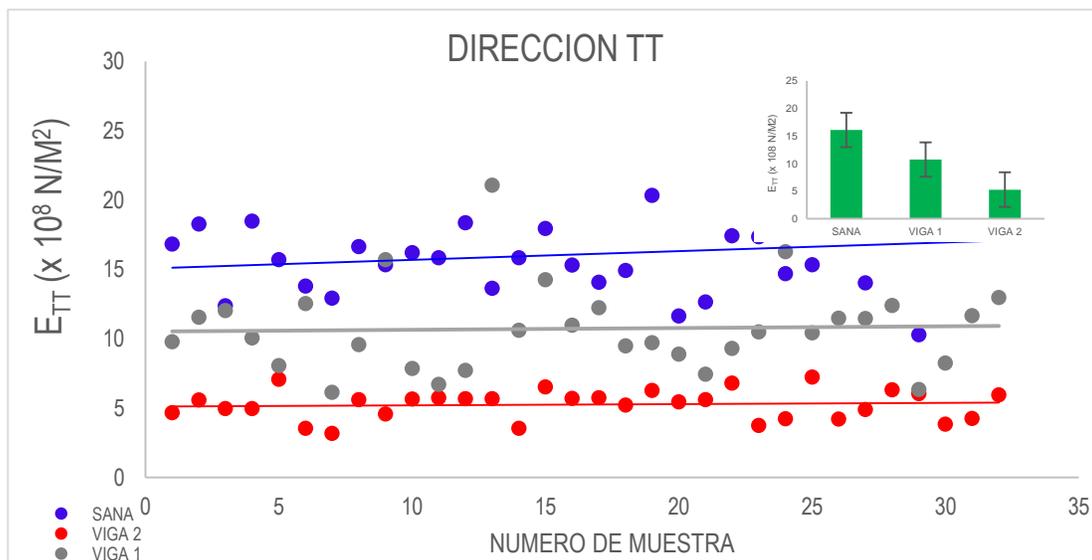
La siguiente tabla muestra como existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido TT con la velocidad longitudinal (ver figura 9.21).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido TT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		350.44	631.64
Viga 1(80%)	-350.44		281.20
Viga 2 (40%)	-631.64	-281.20	

Figura 9. 21 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal

9.1.1.8. Módulo de Young. Grafica de resultados del Módulo de Young, para los tres tipos de muestras en el sentido tangencial (TT).

Los valores promedio del Módulo de Young, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido tangencial (TT) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.22).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	16.09	10.73	5.26
Desviación Estándar	2.86	3.12	1.05

Figura 9. 22 Resultados para el módulo de Young, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de Young en el sentido TT, (ver figura 9.23).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
147.74	1.3455E-29	1.64

Figura 9. 23 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

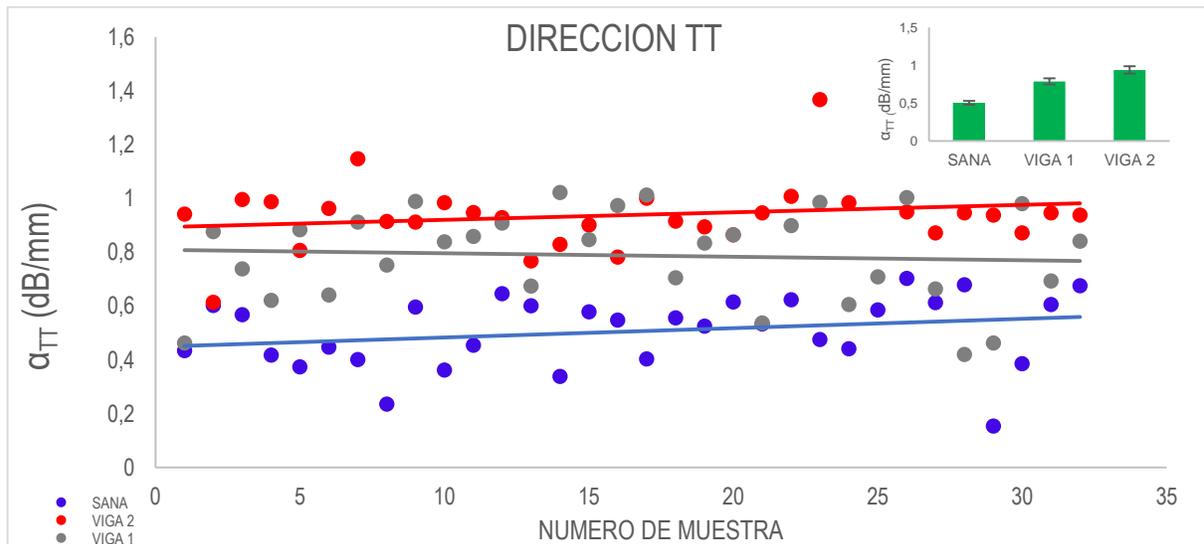
La siguiente tabla muestra como en el Módulo de Young existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido TT con la velocidad longitudinal (ver figura 9.24).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido TT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		5.36	10.83
Viga 1(80%)	5.46		5.46
Viga 2 (40%)	-10.83	-5.46	

Figura 9. 24 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para el módulo de Young

9.1.1.9. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido tangencial de la madera (TT)

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor perdida en la madera sana (valores más bajos) y la perdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos), (ver figura 9.25).



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.50	0.78	0.93
Desviación Estándar	0.13	0.17	0.12

Figura 9. 25 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial

A continuación, se muestran los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación en el sentido TT, (ver figura 9.26).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
72.73	9.6681E-20	0.10

Figura 9. 26 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2.

La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido TT con la velocidad longitudinal (ver figura 9.27).

Correlación de la Atenuación en el sentido TT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.28	-0.43
Viga 1(80%)	0.28		-0.15
Viga 2 (40%)	0.43	0.15	

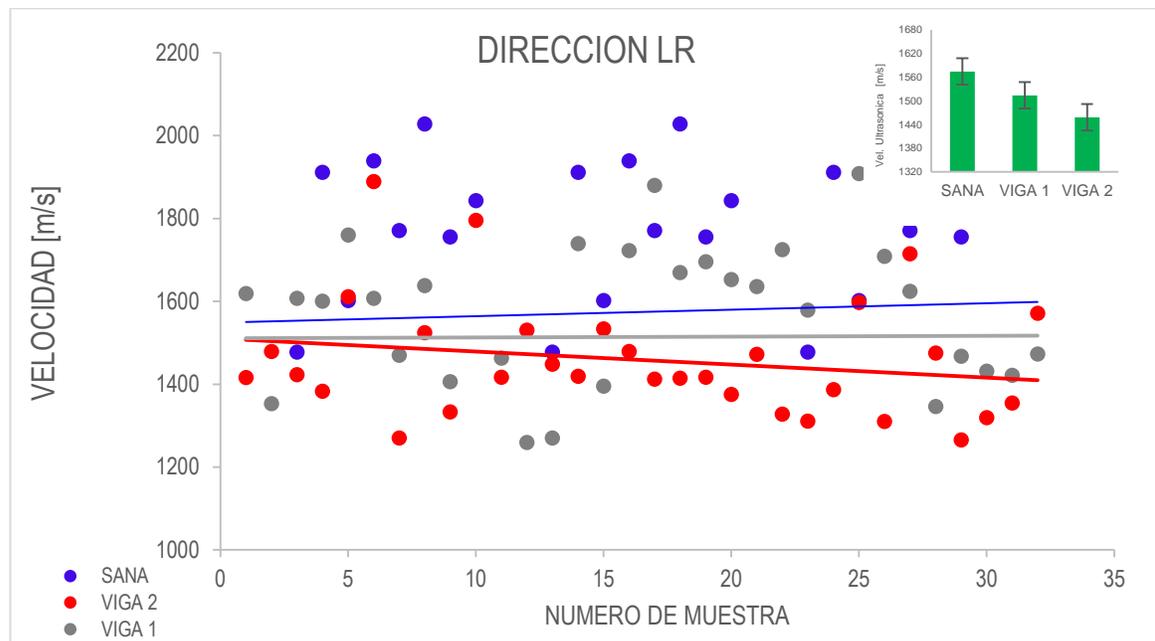
Figura 9. 27 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad longitudinal, para la atenuación

9.1.2 Velocidad de onda Transversal

Las gráficas siguientes presentan los valores obtenidos con la velocidad transversal; las mediciones efectuadas (se realizaron dos por cada cara de las muestras) a las 35 muestras por cada tipo de madera (sana, viga 1 y viga 2), en cada uno de sus sentidos (longitudinal radial, longitudinal transversal, radial longitudinal, radial tangencial, tangencial longitudinal y tangencial radial). A continuación, se muestran las gráficas de resultados de Velocidad longitudinal, Velocidad transversal, Módulo de Young, Módulo de corte y Atenuación, para cada sentido de las mediciones para los tres tipos de muestras.

9.1.2.1. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal radial (LR)

La siguiente grafica muestra como la Velocidad transversal, en el sentido longitudinal radial de las muestras de la madera sana (LR); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.28).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	1574.38	1514.02	1458.32
Desviación Estándar	409.14	275.95	144.28

Figura 9. 28 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad transversal en el sentido LR (ver figura 9.29).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
1.22	0.298895126	193.64

Figura 9. 29 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

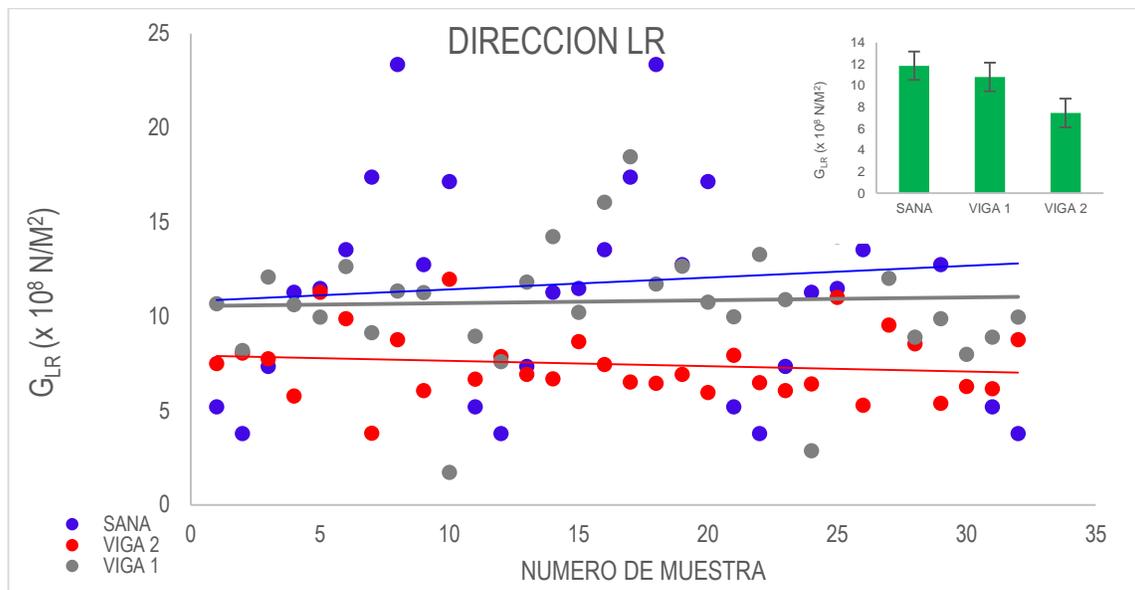
La siguiente tabla muestra como no existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido LR con la velocidad transversal (ver figura 9.30).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido LR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		60.36	116.05
Viga 1(80%)	55.69		55.69
Viga 2 (40%)	-116.05	55.69	

Figura 9. 30 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal

9.1.2.2. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (LR)

Los valores promedio del Módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial (LR) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.31).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	11.83	10.79	7.45
Desviación Estándar	5.91	3.36	1.83

Figura 9. 31 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de corte para la Velocidad transversal en el sentido LR (ver figura 9.32).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
10.11	0.000106316	2.66

Figura 9. 32 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2

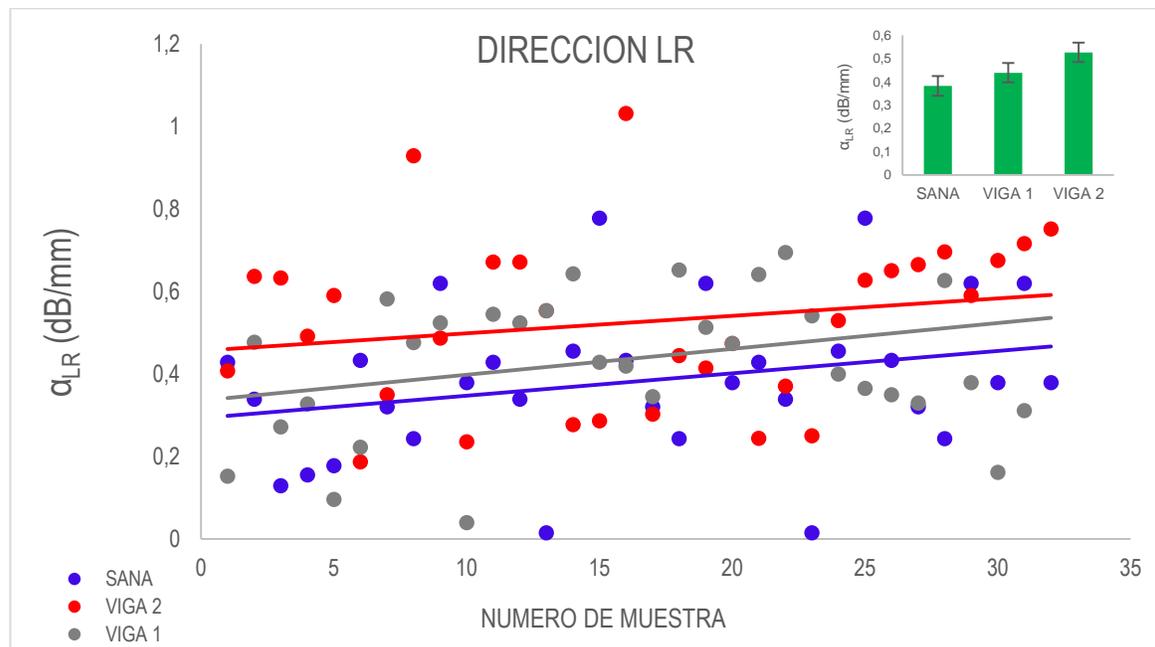
La siguiente tabla muestra como en el Módulo de Corte existen diferencias significativas entre las muestras de la viga 2, de la madera y con la viga 1, y que entre la madera sana y la viga 1 no existen diferencias significativas en el sentido LR con la velocidad transversal (ver figura 9.33).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido LR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		1.03	4.37
Viga 1(80%)	-1.03		3.34
Viga 2 (40%)	-4.37	-3.34	

Figura 9. 33 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad tranversal, para el módulo de Corte

9.1.2.3 Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (LR)

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor perdida en la madera sana (valores más bajos) y la perdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos) (ver figura 9.34).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.38	0.43	0.52
Desviación Estándar	0.18	0.19	0.20

Figura 9. 34 Resultados de la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación con la Velocidad transversal en el sentido LR (ver figura9.35).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
4.40	0.01498611	0.13

Figura 9. 35 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.

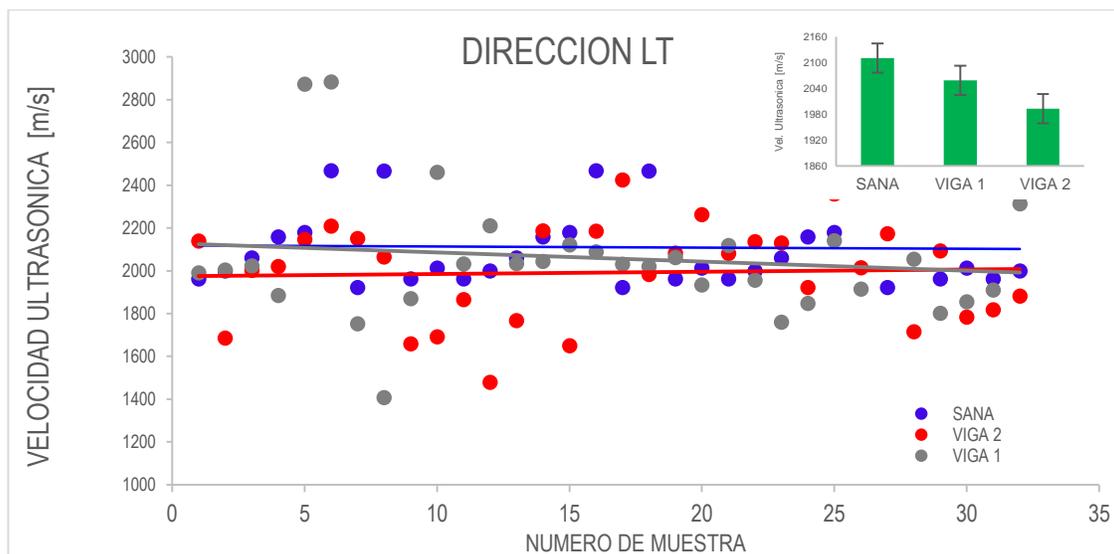
La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen estadísticamente significativas solo en las muestras de la madera sana y la viga 2, entre la madera sana y la viga 1 no existen diferencias significativas, así como tampoco existen diferencias significativas entre la viga 1 y la viga 2 en el sentido LR con la velocidad transversal (ver figura 9.36).

Correlación de la Atenuación en el sentido LR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.05	-0.14
Viga 1(80%)	0.05		-0.08
Viga 2 (40%)	0.14	0.08	

Figura 9. 36 Resultados de la relación entre el sentido LR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.4. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal transversal (LT)

La siguiente grafica muestra como la Velocidad transversal, en el sentido longitudinal transversal de las muestras de la madera sana (LT); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.37).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	2110.44	2058.42	1992.56
Desviación Estándar	191.00	294.33	227.56

Figura 9. 37 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal transversal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad transversal en el sentido LR (ver figura 8.114).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
1.92	0.153048575	157.50

Figura 9. 38 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

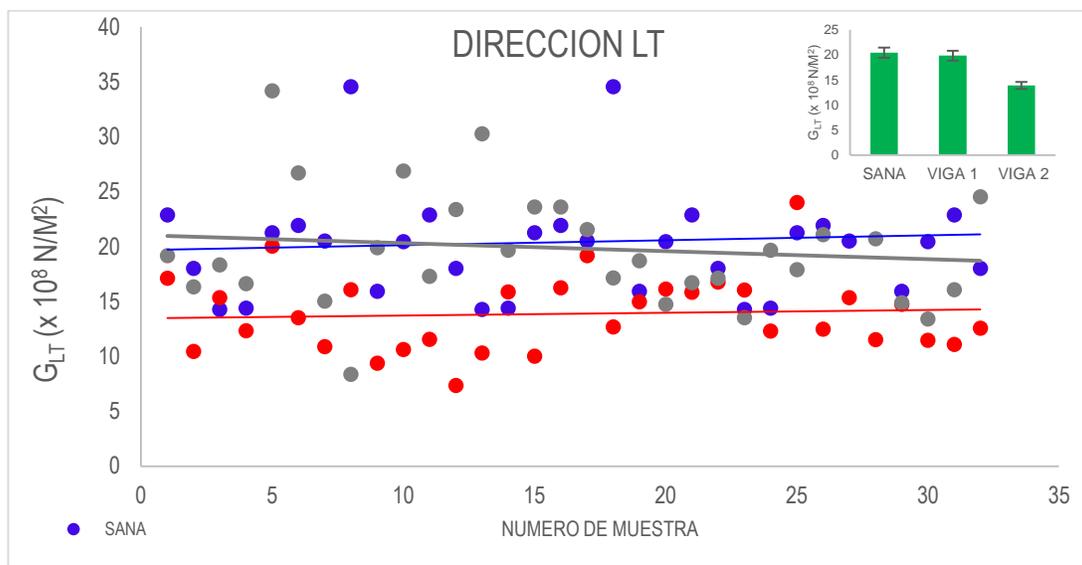
La siguiente tabla muestra como no existe una diferencia significativa entre las caras de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en el sentido LT con la Velocidad transversal (ver figura 9.38).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido LT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		52.02	117.87
Viga 1(80%)	65.85		65.85
Viga 2 (40%)	-117.87	65.85	

Figura 9. 39 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación.

9.1.2.5. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (LT)

Los valores promedio del Módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial de las muestras (LT) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.40).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	20.41	19.83	13.87
Desviación Estándar	5.50	5.40	3.49

Figura 9. 40 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal tangencial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de corte con la Velocidad transversal en el sentido LT (ver figura 9.41).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
17.54	3.44431E-07	3.19

Figura 9. 41 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

La siguiente tabla muestra como el Módulo de Corte no existen diferencias significativas entre todas las muestras sanas, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido LT con la Velocidad transversal (ver figura 9.42).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido LT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		0.57	6.53
Viga 1(80%)	-0.57		5.96
Viga 2 (40%)	-6.53	-5.96	

Figura 9. 42 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.6. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (LT).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor pérdida en la madera sana con valores más bajos y la pérdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 con valores más altos (ver figura 9.43).

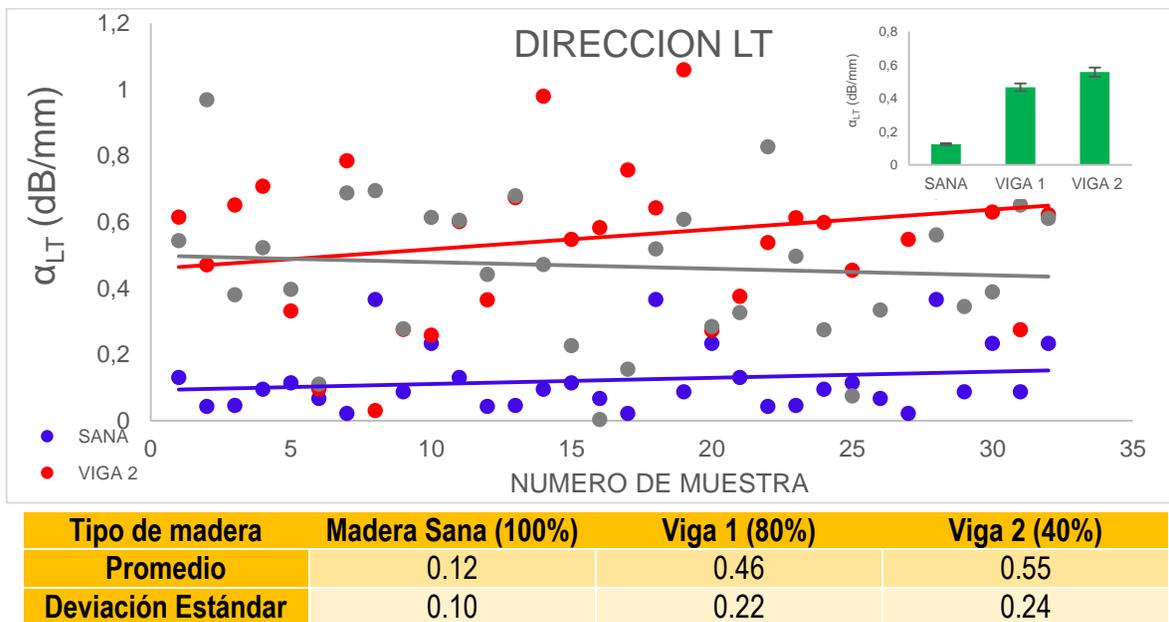


Figura 9. 43 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido longitudinal tangencial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido LT (ver figura 9.44).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
41.68	1.19129E-13	0.13

Figura 9. 44 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

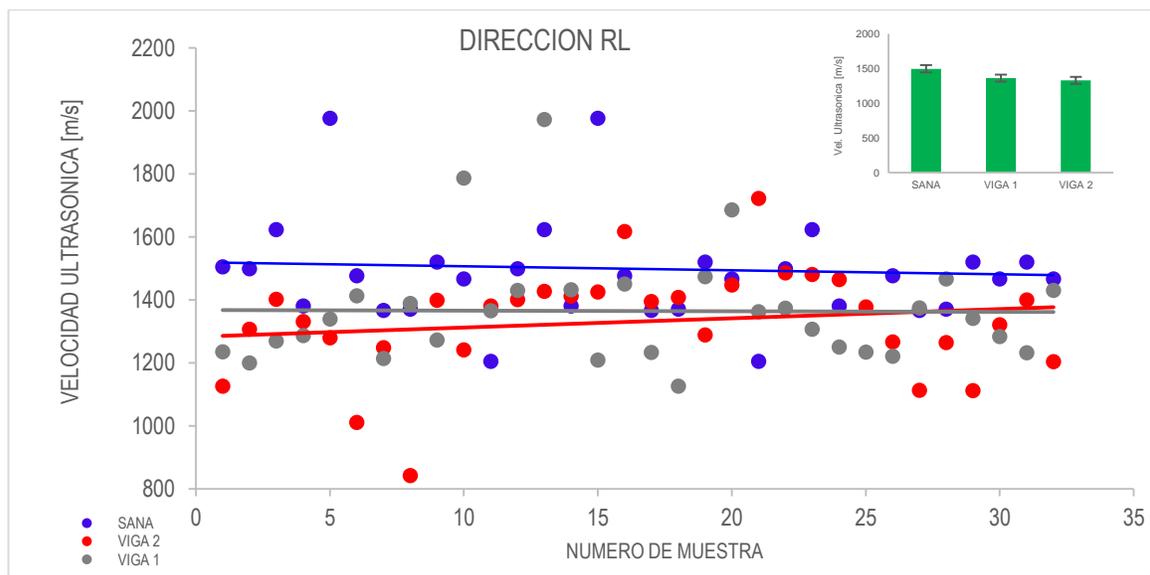
La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre las muestras de madera sana, en la viga 1 y en la viga 2, pero entre la viga 1 y la viga 2 no existen diferencia significativa entre ellas en el sentido LT con la velocidad transversal (ver figura 9.45).

Correlación de la Atenuación en el sentido LT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.34	-0.43
Viga 1(80%)	0.34		-0.09
Viga 2 (40%)	0.43	0.09	

Figura 9. 45 Resultados de la relación entre el sentido LT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.7. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal radial (RL).

La siguiente grafica muestra como la velocidad transversal, en el sentido radial longitudinal de las muestras de la madera sana (RL); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.46).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	1498.53	1364.67	1331.60
Desviación Estándar	184.53	176.50	170.02

Figura 9. 46 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad transversal en el sentido LT (ver figura 9.47).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
7.97	0.000638909	115.54

Figura 9. 47 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

La siguiente tabla se muestra como existen diferencias significativas en las muestras de la madera sana, en la viga 1 y en la viga 2, en entre la viga 1 y viga 2 no existen diferencias significativas entre ellas en el sentido RL con la velocidad transversal (ver figura 9.48).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido RL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		133.85	166.93
Viga 1(80%)	133.85		33.07
Viga 2 (40%)	-166.93	-33.07	

Figura 9. 48 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación.

9.1.2.8. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (RL).

Los valores promedio del Módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial de las muestras (RL) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.49).

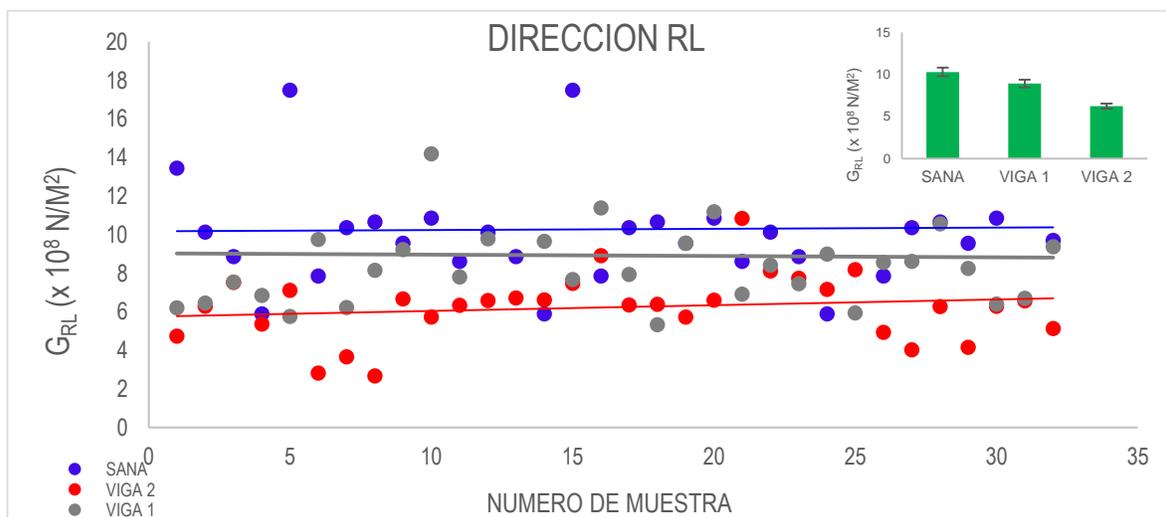


Figura 9. 49 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido RL (ver figura 9.50).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
14.51	3.2666E-06	1.99

Figura 9. 50 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

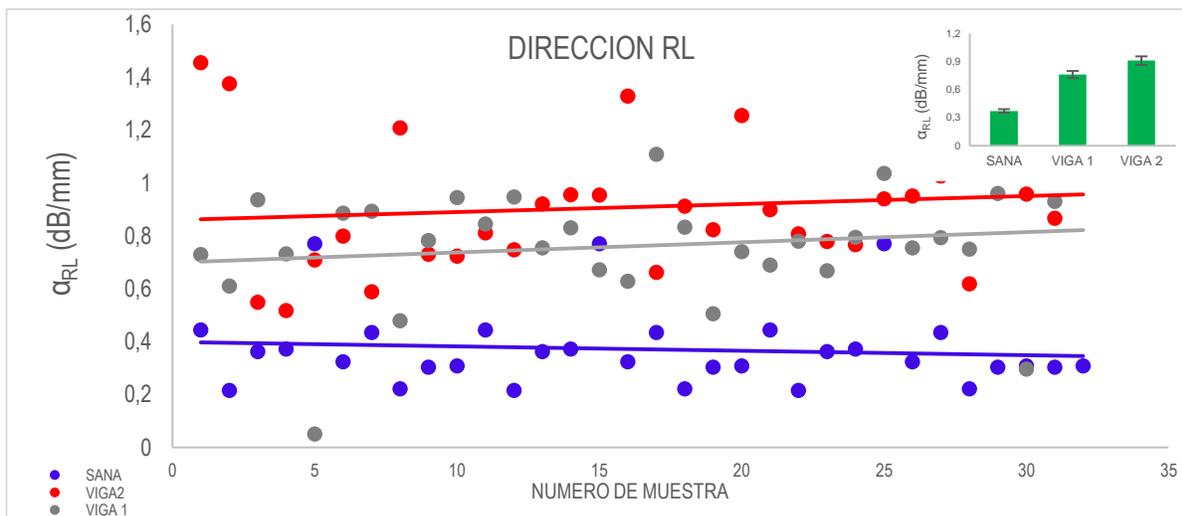
La siguiente tabla muestra como el en el Módulo de Corte existen diferencias significativas en las muestras de madera sana y la viga 1, que la viga 2, en tanto que entre la madera sana y en la viga 1 no existen diferencias significativas en el sentido RL con la velocidad transversal (ver figura 9.51).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido RL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		1.36	4.04
Viga 1(80%)	-1.36		2.67
Viga 2 (40%)	-4.04	-2.67	

Figura 9. 51 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.9. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (RL).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor pérdida en la madera sana (valores más bajos) y la pérdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos), (ver figura 9.52).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.37	0.76	0.91
Desviación Estándar	0.14	0.21	0.24

Figura 9. 52 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido RL (ver figura 9.53).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
57.62	5.25424E-17	0.14

Figura 9. 53 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2

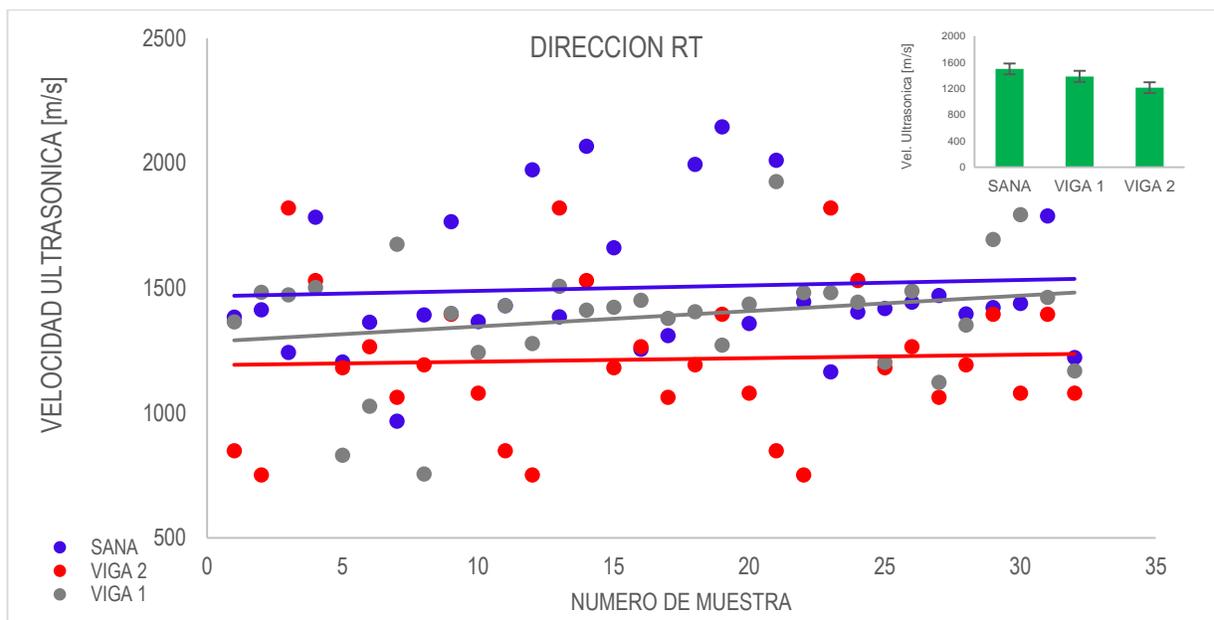
La siguiente tabla se muestra como en la Atenuación se presentan diferencias significativas en las muestras de madera sana en relación con la viga 1 y la viga 2, y que no existen diferencias significativas entre la viga 1 y la viga 2 en el sentido RL con la velocidad tranversal (ver figura 9.54).

Correlación de la Atenuación en el sentido RL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.39	-0.53
Viga 1(80%)	0.39		-0.14
Viga 2 (40%)	0.53	0.14	

Figura 9. 54 Resultados de la relación entre el sentido RL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad tranversal, para la atenuación

9.1.2.10. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal radial (RT).

La siguiente grafica muestra como la Velocidad transversal en el sentido radial tangencial de las muestras de la madera sana (RT); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.55).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	1502.64	1386.41	1214.29
Desviación Estándar	289.85	238.39	296.78

Figura 9. 55 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido tangencial radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Velocidad transversal en el sentido RT (ver figura 9.56).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
8.83	0.000309305	180.19

Figura 9. 56 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

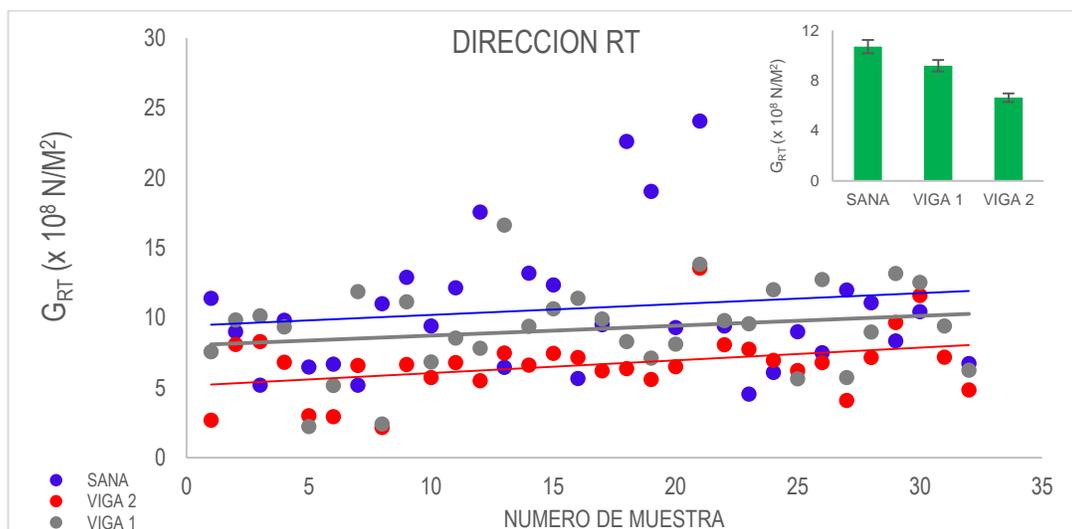
La siguiente tabla muestra como entre la madera sana y la viga 2 existen diferencias significativas, pero que en la madera sana y la viga 1 no existen diferencias significativas, así como tampoco existen diferencias significativas entre la viga 1 y la viga 2 en el sentido TR con la velocidad transversal (ver figura 9.57).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido TR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		116.23	288.34
Viga 1(80%)	-116.23		-172.11
Viga 2 (40%)	-288.34	-172.11	

Figura 9. 57 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal

9.1.2.11. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (RT).

Los valores promedio del Módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial de las muestras (RT) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.58).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	10.72	9.19	6.64
Desviación Estándar	4.96	3.13	2.33

Figura 9. 58 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial transversal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido RT (ver figura 9.59).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
10.21	9.78084E-05	2.38

Figura 9. 59 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

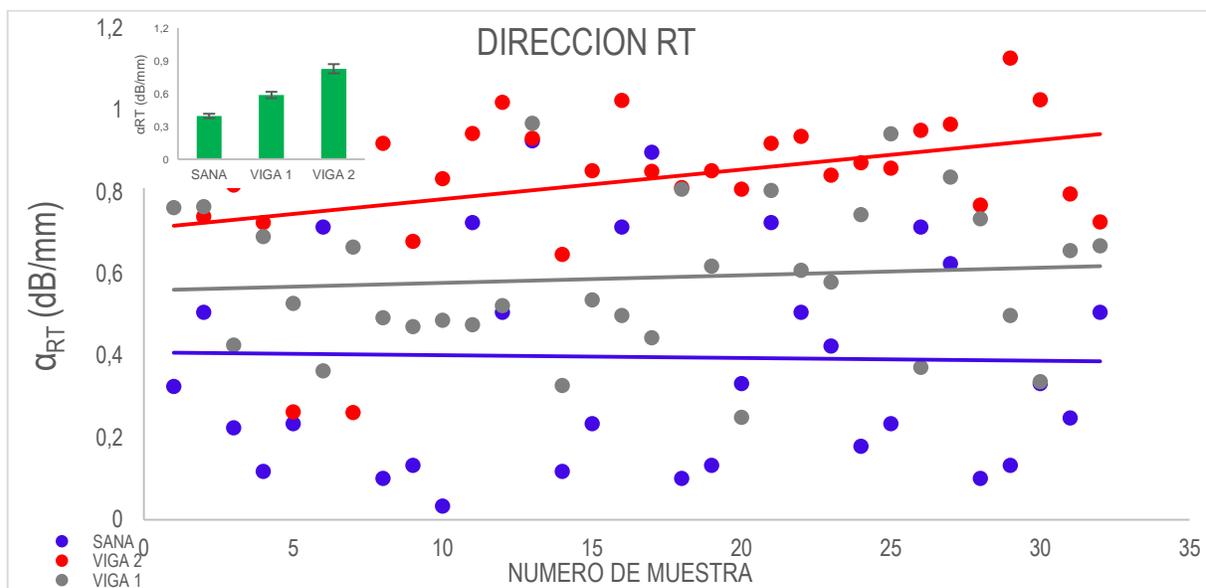
La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre todas las muestras de madera de la viga 2, la madera sana y la viga 1, pero que no existen diferencias significativas entre la madera sana y la viga 1 en el sentido TR con la velocidad longitudinal (ver figura 9.60)

Correlación del Módulo de Corte en el sentido TR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-1.53	4.08
Viga 1(80%)	-1.53		2.55
Viga 2 (40%)	-4.08	-2.55	

Figura 9. 60 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte

9.1.2.12. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (RT).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor pérdida en la madera sana con valores más bajos y la pérdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 con valores más altos, (ver figura 9.601).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.39	0.58	0.82
Desviación Estándar	0.27	0.18	0.18

Figura 9. 61 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido radial tangencial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido RT (ver figura 9.62).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
31.75	3.08793E-11	0.14

Figura 9. 62 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2.

La siguiente tabla muestra como en la Atenuación ultrasónica existen diferencias significativas en todas las muestras de madera sana, de la viga 1 y la viga 2 en el sentido TR con la velocidad longitudinal (ver figura 9.63).

Correlación de la Atenuación en el sentido RT			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.19	-0.43
Viga 1(80%)	0.19		-0.23
Viga 2 (40%)	0.43	0.23	

Figura 9. 63 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.13. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal radial (TL).

La siguiente grafica muestra como la Velocidad transversal en el sentido transversal longitudinal de las muestras de la madera sana (TL); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.64).

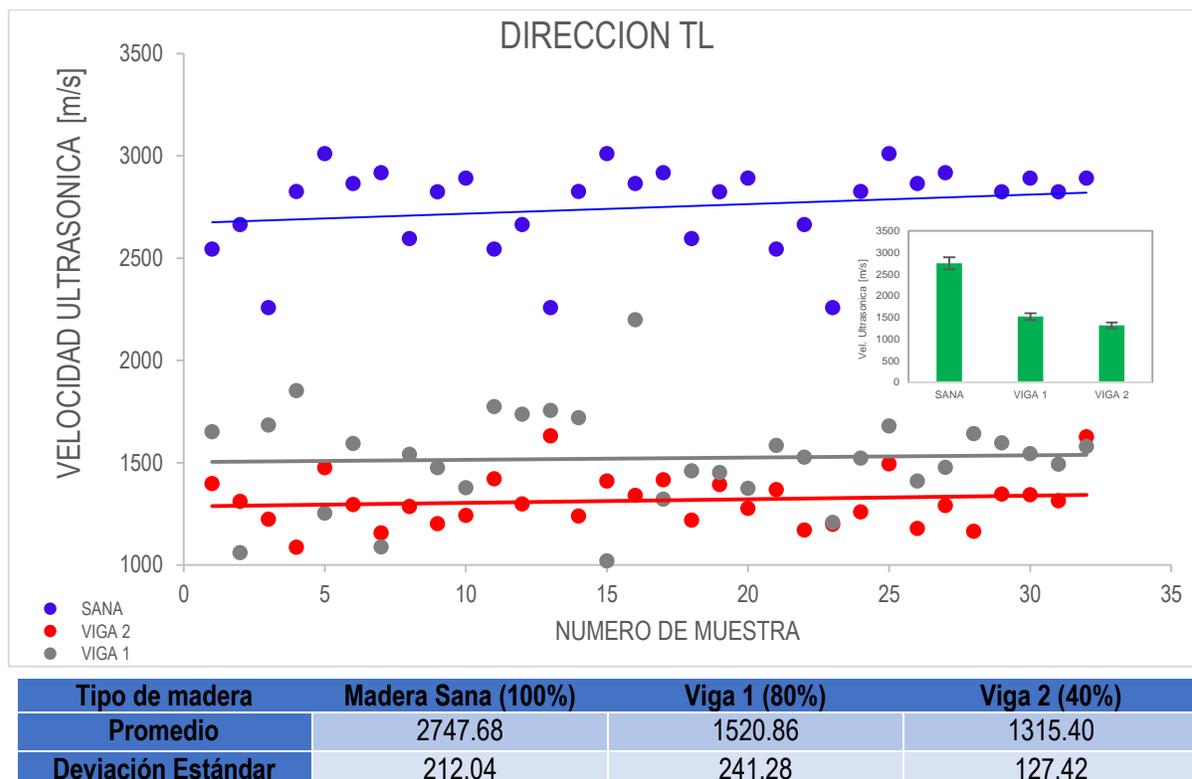


Figura 9. 64 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la velocidad transversal en el sentido TL (ver figura 9.65).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
482.17	8.10255E-50	130.14

Figura 9. 65 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1y viga 2

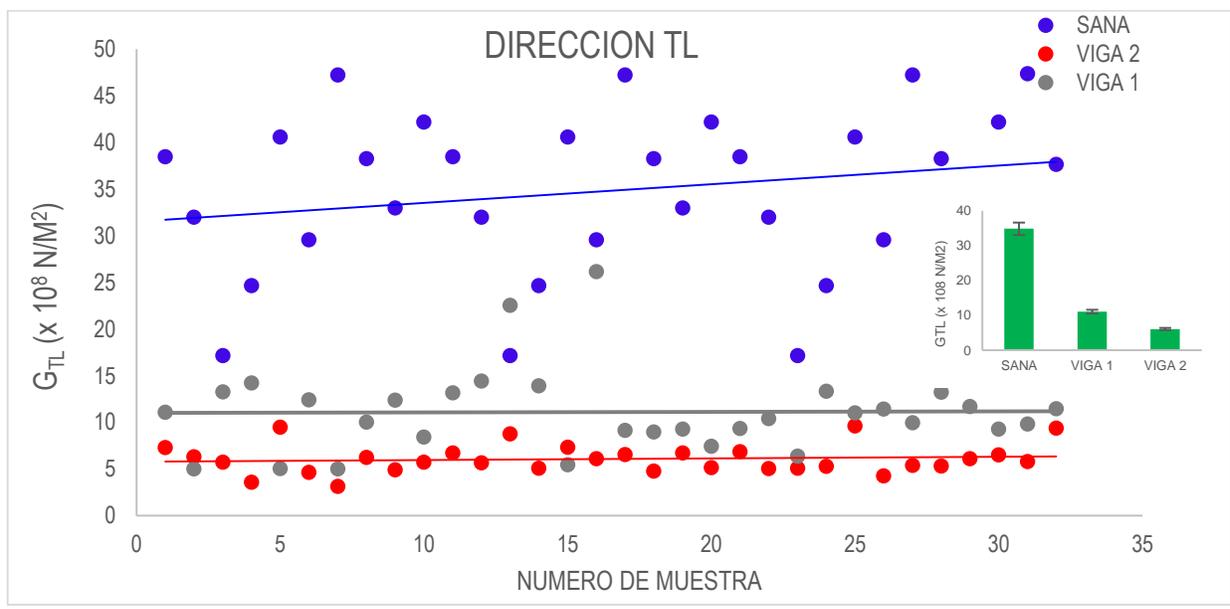
La tabla muestra como existen diferencias significativas en todas las muestras de la madera sana, de la viga 1 y de la viga 2 en el sentido TL con la velocidad transversal (ver figura 9.66).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido TL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		1226.81	1432.27
Viga 1(80%)	-1226.81		205.46
Viga 2 (40%)	-1432.27	-205.46	

Figura 9. 66 Resultados de la relación entre el sentido TT de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal

9.1.2.14. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (TL).

Los valores promedio del Módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial de las muestras (TL) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.67).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	34.83	11.09	6.08
Desviación Estándar	8.67	4.46	1.57

Figura 9. 67 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Módulo de corte con la velocidad transversal en el sentido TL (ver figura 9.68).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
231.85	7.29125E-37	3.72

Figura 9. 68 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Corte, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

La siguiente tabla muestra como en el Módulo de Young existen diferencias significativas en todas las muestras de madera sana, en la viga 1 y en la viga 2 en el sentido TT con la velocidad longitudinal (ver figura 9.69).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido TL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		23.73	28.74
Viga 1(80%)	5.00		5.00
Viga 2 (40%)	-28.74	-5.00	

Figura 9. 69 Resultados de la relación entre el sentido TL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad tranversal, para el módulo de Corte

9.1.2.15. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (TL).

En el caso de la atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor pérdida en la madera sana (valores más bajos) y la pérdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 (valores más altos) ver figura 9.70.

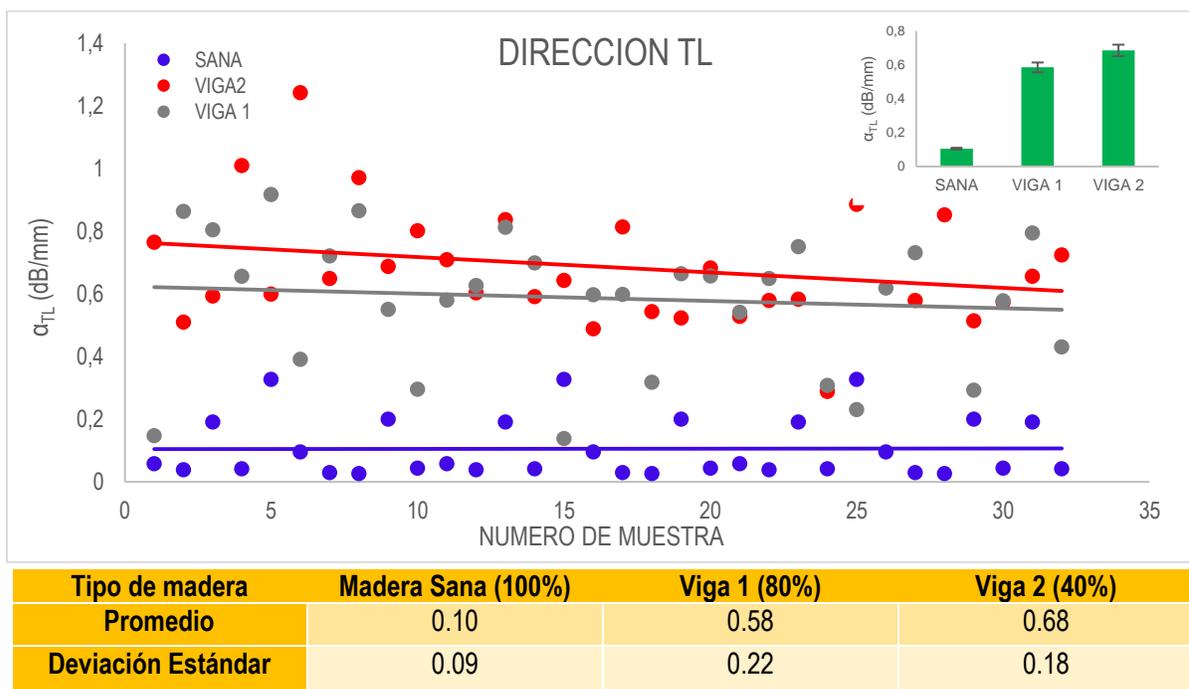


Figura 9. 70 Resultados para la atenuación ultrasónica, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal longitudinal

La siguiente tabla muestra los valores de F, de p y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido TL (ver figura 9.71).

Valor de F	Valor de p	Prueba de Diferencia de Medias
98.76	9.9E-24	0.11

Figura 9. 71 Resultados del valor de F, el valor de p y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

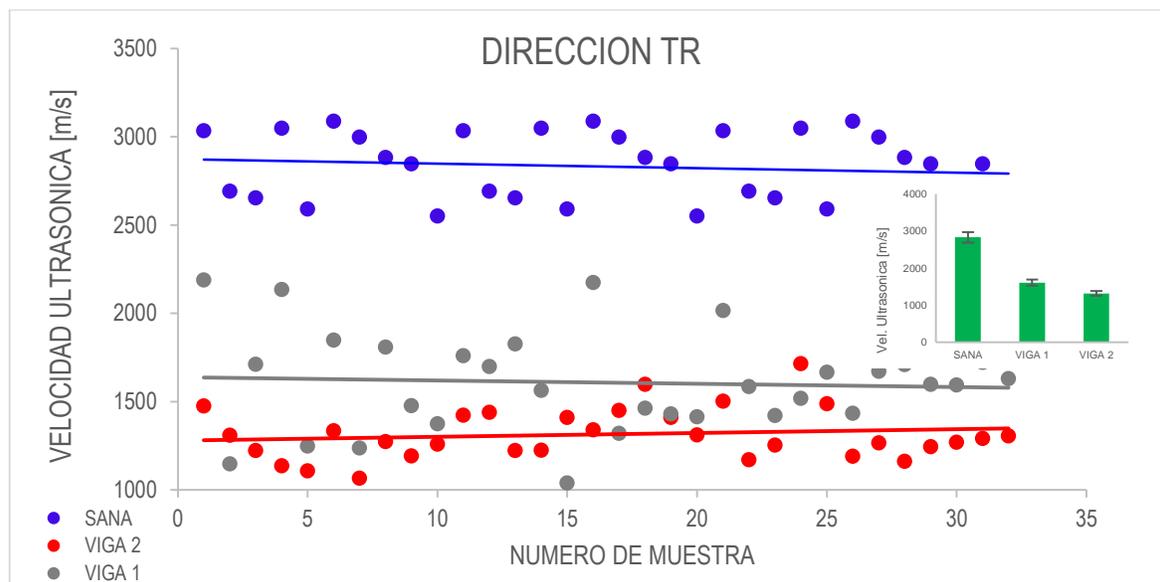
La tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas en todas las muestras de madera sana con respecto a la viga 1 y a la viga 2, y que entre la viga 1 y la viga 2 no existen diferencias significativas en el sentido TL con la velocidad longitudinal (ver figura 9.72).

Correlación de la Atenuación en el sentido TL			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.47	-0.57
Viga 1(80%)	0.47		-0.10
Viga 2 (40%)	0.57	0.10	

Figura 9. 72 Resultados de la relación entre el sentido TL de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.1.2.16. Grafica de resultados para la Velocidad Transversal, en el sentido longitudinal radial (TR).

La siguiente grafica muestra como la Velocidad transversal en el sentido transversal radial de las muestras de la madera sana (TR); tiene valores más altos y presenta valores más bajos en la madera de las muestras de la viga 2. Los valores promedios y la desviación estándar nos presentan esta misma tendencia (ver figura 9.73).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	2830.42	1608.57	1315.70
Desviación Estándar	195.85	280.73	144.77

Figura 9. 73 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la velocidad transversal en el sentido TR (ver figura 9.74).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
448.63	1.70669E-48	139.97

Figura 9. 74 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

La tabla muestra como existen diferencias significativas entre las muestras de la viga 2, la madera sana, y la viga 1, pero que no existen diferencias significativas entre la viga 1 y la viga 2 en el sentido TR con la velocidad transversal (ver figura 9.75).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido TR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		1221.84	1514.72
Viga 1(80%)	-1221.84		292.87
Viga 2 (40%)	-1514.72	-292.87	

Figura 9. 75 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal

9.1.2.17. Módulo de Corte. Grafica de resultados del Módulo de corte, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial (TR).

Los valores promedio del módulo de corte, nos muestran que es más alto este valor en las muestras de madera sana en el sentido longitudinal radial de las muestras (TR) y nos presenta esta misma tendencia en la desviación estándar (ver figura 9.76).

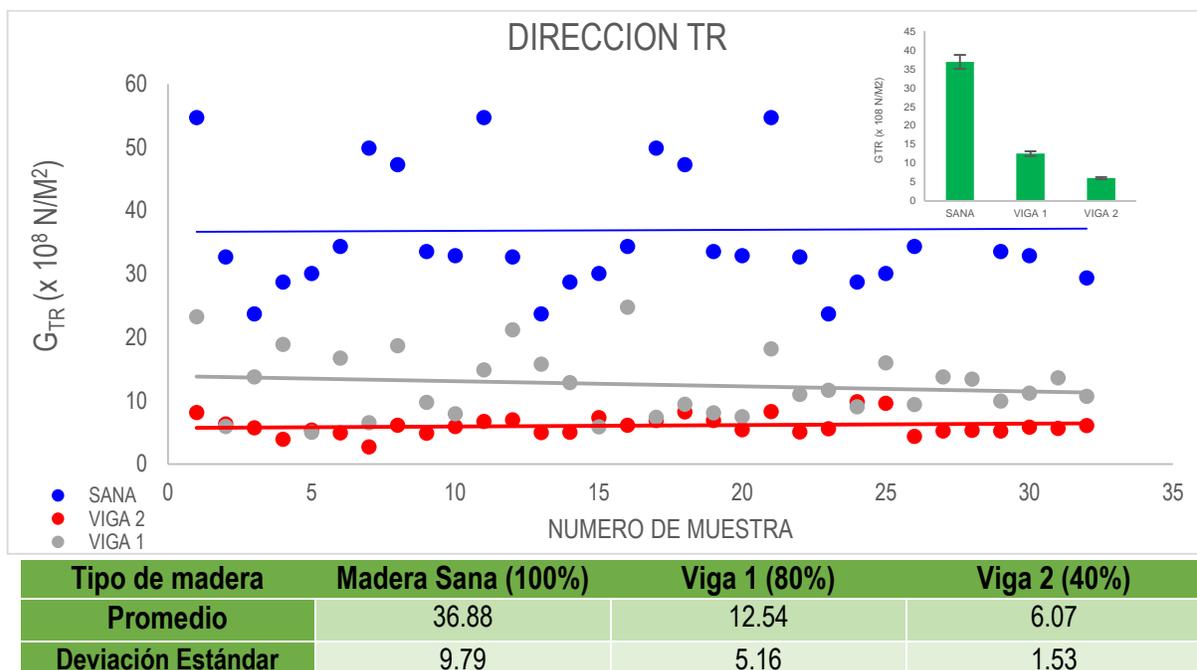


Figura 9. 76 Resultados para el módulo de corte, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial.

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para el Módulo de corte en la velocidad transversal en el sentido TR (ver figura 9.77).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
202.68	1.25522E-34	4.21

Figura 9. 77 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

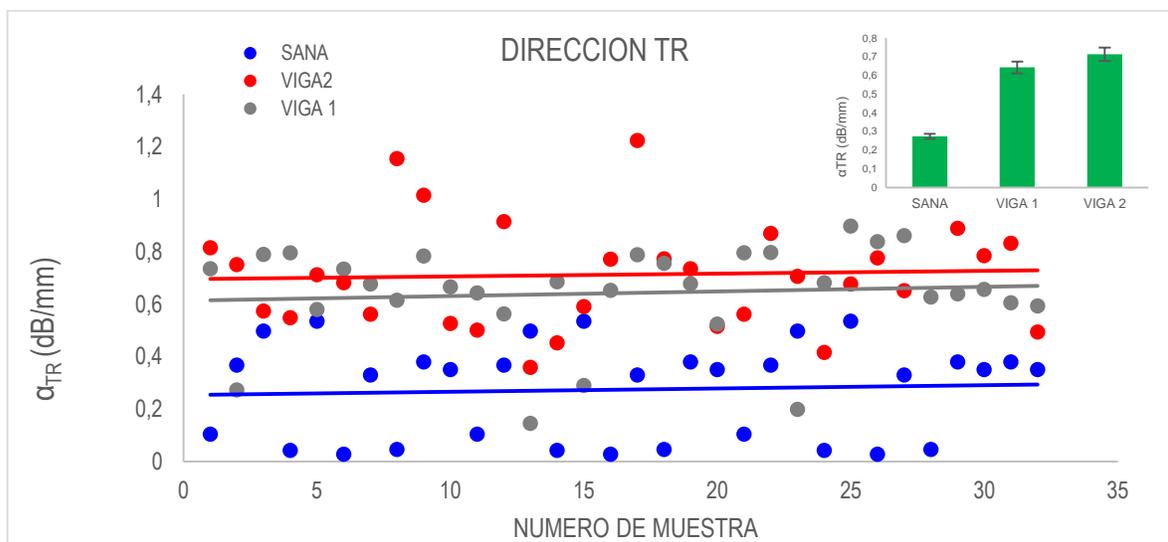
La tabla muestra como en el Módulo de Corte existen diferencias significativas entre todas las muestras de madera sana, de la viga 1 y de la viga 2 en el sentido TR con la velocidad transversal (ver figura 9.78).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido TR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		24.33	30.81
Viga 1(80%)	-24.33		-6.47
Viga 2 (40%)	-30.81	-6.47	

Figura 9. 78 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para el módulo de Corte

9.1.2.18. Atenuación. Grafica de resultados de la Atenuación ultrasónica, para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal radial de la madera (TR).

En el caso de la Atenuación ultrasónica los valores presentados reflejan una menor pérdida en la madera sana con valores más bajos y la pérdida mayor en la madera de las muestras de la viga 2 con valores más altos, (ver figura 9.79).



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
Promedio	0.27	0.64	0.71
Desviación Estándar	0.18	0.18	0.20

Figura 9. 79 Resultados para la velocidad transversal, la desviación Estándar y el promedio en el sentido transversal radial

La siguiente tabla muestra los valores de F, de ρ y de la diferencia de medias para la Atenuación ultrasónica en la velocidad transversal en el sentido TR (ver figura 9.80).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
48.47	3.79984E-15	0.12

Figura 9. 80 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la atenuación, para las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2

La siguiente tabla muestra como en la Atenuación existen diferencias significativas entre todas las muestras de madera sana, de la viga 1 y la viga 2, pero encontramos que entre la viga 1 y la viga 2 no existen diferencias significativas en el sentido TR con la velocidad transversal (ver figura 9.81).

Correlación de la Atenuación en el sentido TR			
	Madera Sana (100%)	Viga 1(80%)	Viga 2 (40%)
Madera Sana (100%)		-0.36	-0.43
Viga 1(80%)	0.36		0.07
Viga 2 (40%)	-0.43	0.07	

Figura 9. 81 Resultados de la relación entre el sentido TR de las muestras de madera sana, viga 1 y viga 2 en la velocidad transversal, para la atenuación

9.2 Velocidad Longitudinal para los sentidos LL, RR y TT.

La Velocidad longitudinal para los tres tipos de muestras (madera sana, viga 1 y viga 2) nos permite determinar el grado de deterioro que tenemos entre ellas. Tomando en cuenta que la muestra sana está en óptimas condiciones diremos que esta madera está en un 100%, las muestras de la viga 1 nos arrojan resultados con los cuales se determinó que estas muestras presentan un deterioro de un 20% en relación con la madera sana (se consideró que la viga 1 está en un 80% sana). Las muestras de la viga 2 indican que esta madera está deteriorada en un 60% en relación con la madera sana (la viga 2 se consideró que esta en un 40% sana).

Las velocidades más altas se presentan para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal (LL) y los valores más bajos en el sentido transversal (TT). En la figura 9.82 se presentan los valores promedio. La viga 2 que presenta un 60 % de deterioro, disminuye su velocidad en un 40% comparada con la madera sana.

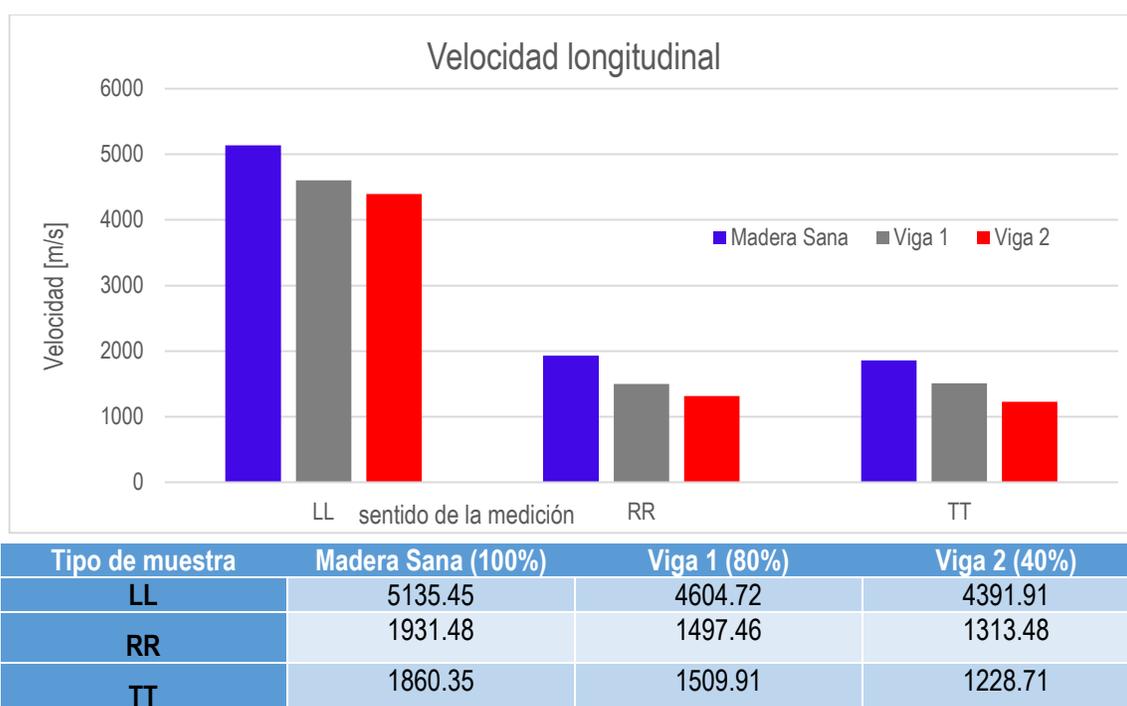


Figura 9. 82 Resultados para la velocidad longitudinal, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal, radial y tangencial

La medición de la Velocidad longitudinal en las tres caras de cada una de las muestras nos permite realizar una correlación y poder analizar si estas son similares entre ellas o no. La siguiente tabla nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias, con un 95% de probabilidad (ver figura 9.83).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
2002.7	3.52378E-77	154.24

Figura 9. 83 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial).

Estos valores nos permiten determinar como la velocidad longitudinal en las tres caras para las muestras sanas nos indican que existen diferencias significativas entre el sentido LL, en relación con los sentidos RR y TT, entre el sentido TT y RR, no existen diferencias significativas (ver figura 9.81).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido LL, RR, y TT			
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT
LL		3203.97	3275.10
RR	-3203.97		71.12
TT	-3275.10	-71.12	

Figura 9. 84 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial)

La tabla 9.82 es el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.82).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
1179.59	8.32304E-67	192.36

Figura 9. 85 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

Con los datos anteriores es posible ver como en el sentido longitudinal existen diferencias significativas entre los sentidos LL, RR y TT, pero entre los sentidos RR y TT no existen diferencias significativas, (ver figura 9.86).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT
LL		3107.26	3094.80
RR	-3107.26		-12.45
TT	-3094.80	12.45	

Figura 9. 86 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial).

Los valores de la figura 9.84 nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras.

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
4249.01	3.99368E-92	102.03

Figura 9. 87 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial).

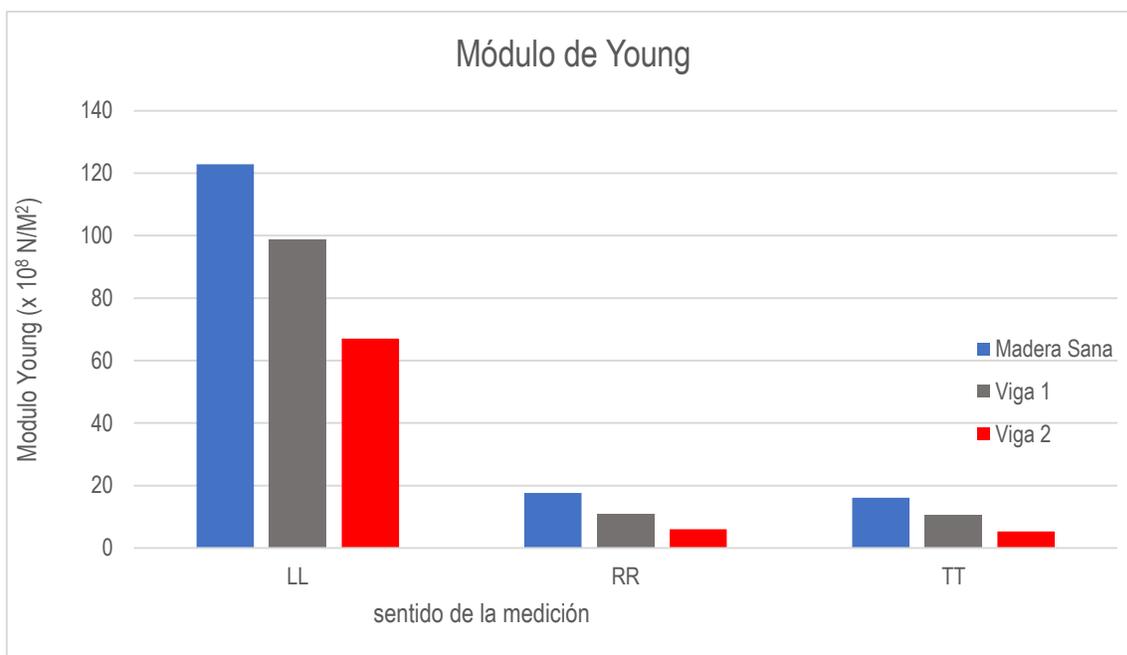
Las mediciones de la velocidad longitudinal en las muestras de madera de la viga 2, existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas en el sentido longitudinal (ver figura 9.87).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT
LL		3078.42	3163.19
RR	-3078.42		84.76
TT	-3163.19	-84.763	

Figura 9. 88 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 para la velocidad longitudinal (longitudinal, radial y tangencial).

9.2.1 Módulo de Young para los sentidos LL, RR, y TT.

En relación con el Módulo de Young se pudo observar que los valores más altos se encontraron para las tres muestras en el sentido longitudinal (LL) y los más bajos en el sentido transversal (TT), (ver figura 9.86) La estructura de la madera nos explica por qué se presenta esta diferencia



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
LL	122.86	98.93	67.02
RR	17.62	10.80	5.99
TT	16.09	10.73	5.26

Figura 9. 89 Resultados para el módulo de Young (sentido longitudinal, radial y tangencial)

La medición del módulo de Young utilizando la velocidad longitudinal en las tres caras de las muestras nos da una correlación entre ellas y es posible analizar si estas son similares entre ellas o no. La siguiente tabla nos muestra el valor de F, el valor de p y la diferencia de medias, (ver figura 9.90).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
2002.79	3.52378E-77	154.24

Figura 9. 90 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

Estos valores nos permiten determinar como en el módulo de Young en las tres caras para las muestras sanas existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas, (ver figura 9.91).

Correlación de la Velocidad Longitudinal en el sentido LL, RR, y TT			
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT
LL		3203.97	3275.10
RR	-3203.97		71.12
TT	-3275.10	-71.12	

Figura 9. 91 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial).

La tabla 9.89 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.92).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
1179.59	8.32304E-67	192.36

Figura 9. 92 . Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

Con los datos anteriores es posible ver como el sentido longitudinal existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas, (ver figura 9.93).

Correlación del Módulo de Young en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT
LL		88.13	88.20
RR	-88.13		0.075
TT	-88.20	-0.075	

Figura 9. 93 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial).

Los valores de la figura 9.94 nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras.

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
436.29	5.51695E-48	8.99

Figura 9. 94 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

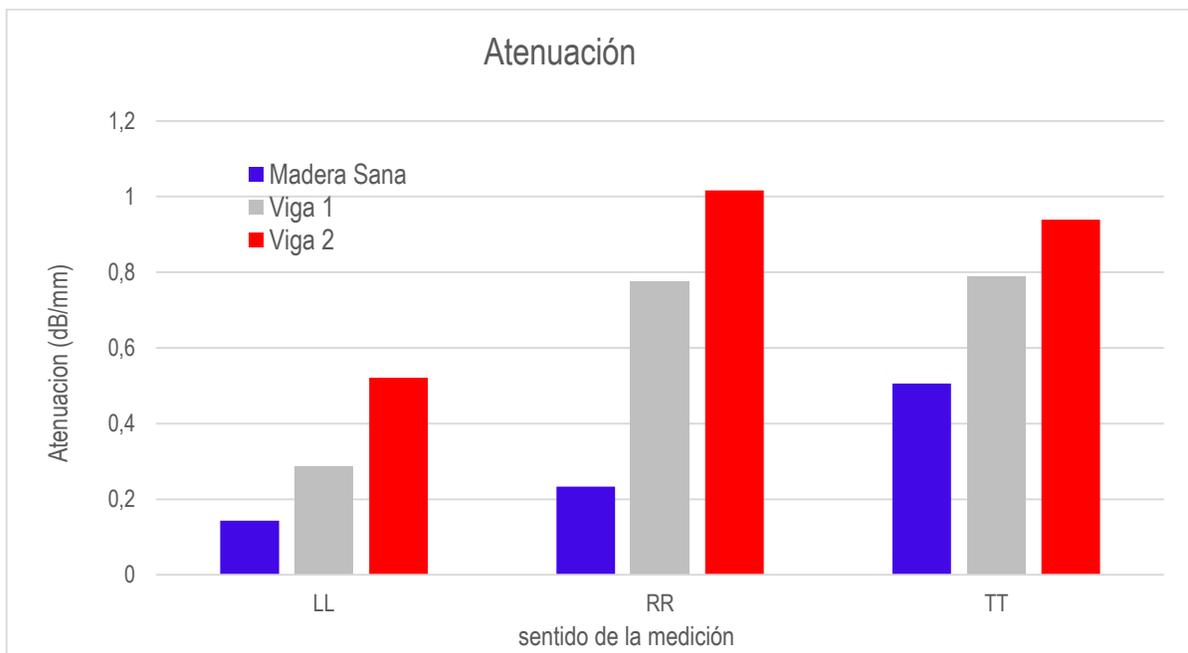
Las mediciones de la velocidad longitudinal en las muestras de madera de la viga 2 existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas (ver figura 9.95).

Correlación del Módulo de Young en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT
LL		61.03	61.76
RR	-61.03		0.72
TT	-61.76	-0.72	

Figura 9. 95 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 el módulo de Young (longitudinal, radial y tangencial)

9.2.2 Atenuación Ultrasónica para los sentidos LL, RR, y TT.

La atenuación ultrasónica se presentó con valores más altos en el sentido radial (RR) y los más bajos en el sentido longitudinal (LL). Esto debido a las características anatómicas de la madera, siendo menor en la madera sana (ver figura 9.96)



Tipo de muestra	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
LL	0.14	0.28	0.52
RR	0.23	0.77	1.01
TT	0.50	0.78	0.93

Figura 9. 96 Resultados para la atenuación, para las maderas en el sentido longitudinal, radial y tangencial

La medición de la Atenuación Ultrasónica utilizando la velocidad longitudinal en las tres caras de las muestras nos da una correlación entre ellas y es posible analizar si estas son similares entre ellas o no. La siguiente tabla nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias, (ver figura 9.97).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
959.47	8.2482E-63	4.22

Figura 9. 97 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

Estos valores nos permiten determinar como la Atenuación en las tres caras existen diferencias significativas entre todas ellas LL, RR y TT (ver figura 9.98).

Correlación de la Atenuación en el sentido LL, RR, y TT			
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT
LL		-0.08	-0.36
RR	0.08		-0.27
TT	0.36	0.27	

Figura 9. 98 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial)

La tabla 9.99 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.99).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
106.92	7.81707E-25	0.07

Figura 9. 99 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencia)

Las mediciones de la atenuación con la utilización de la velocidad longitudinal en las muestras de madera de la viga 1, dice que existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas (ver figura 9.100).

Correlación de la Atenuación en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT
LL		-0.48	-0.49
RR	0.48		-0.01
TT	0.49	0.01	

Figura 9. 100 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial)

Los valores de la figura 9.98 nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras. (ver figura 9.101).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
75.80	2.96388E-20	0.12

Figura 9. 101 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los tres sentidos de las muestras de madera sana (longitudinal, radial y tangencial)

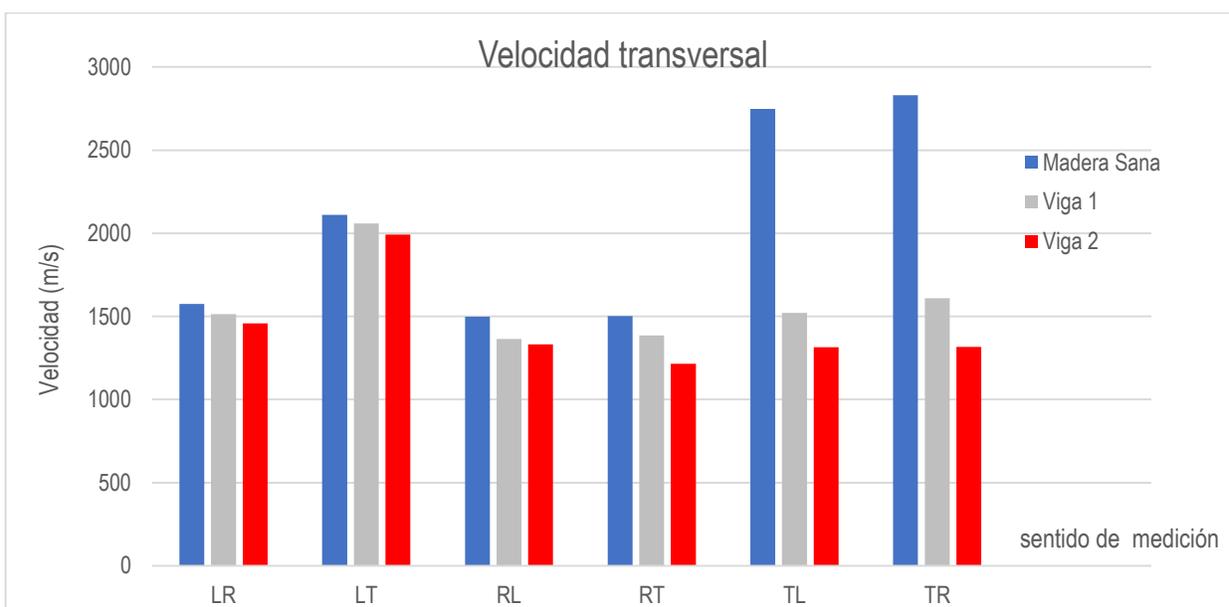
Las mediciones de la atenuación con la utilización de la velocidad longitudinal en las muestras de la viga 2, obtuvimos existen diferencias significativas entre LL, RR y TT, pero entre RR y TT no existen diferencias significativas (ver figura 9.102).

Correlación de la Atenuación en el sentido LL, RR, y TT			
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT
LL		-0.72	-0.65
RR	0.72		0.07
TT	0.65	-0.07	

Figura 9. 102 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 la Atenuación (longitudinal, radial y tangencial)

9.3. Velocidad de onda Transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.

La velocidad transversal para los tres tipos de muestras de madera indica, que este tipo de onda es mayor en el sentido transversal de las muestras sanas (TL y TR). En el sentido longitudinal transversal (LT) para los tres tipos de muestras observamos que los valores son más parecidos, pero menores a los registrados en el sentido transversal de las muestras sanas. Los valores más bajos los presento el sentido radial tangencial (RT) ver figura 9.103.



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
LR	1574.38	1514.02	1458.32
LT	2110.44	2058.42	1992.56
RL	1498.53	1364.67	1331.60
RT	1502.64	1386.41	1214.29
TL	2747.68	1520.86	1315.40
TR	2830.42	1608.57	1315.70

Figura 9. 103 Resultados para la velocidad transversal, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR).

La medición de la velocidad transversal en las tres caras de cada una de las muestras nos permite realizar una correlación y poder analizar si estas son similares entre ellas o no. La siguiente tabla nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias, (ver figura 9.104).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
198.42	2.79669E-34	0.10

Figura 9. 104 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera sana

Estos valores nos permiten determinar como en la velocidad transversal en las tres caras para las muestras sanas existen diferencias significativas entre todos los sentidos LL, LR, LR, RR, RL, RT, TT, TL y TR, (ver figura 9.105).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido LT, LR, RL RT, TL y TR						
Madera Sana (100%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-536.06	75.85	71.74	-1173.30	-1256.04
LT	536.06		611.91	607.80	-637.24	-719.98
RL	-75.85	-611.91		-4.11	-1249.15	-1331.89
RT	-71.74	-607.80	4.11		-1245.04	-1327.78
TL	1173.30	-637.24	1249.15	1245.04		-82.74
TR	1256.04	-719.98	1331.89	1327.78	82.74	

Figura 9. 105 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la velocidad transversal

La tabla 9.106 es el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.106).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
182.79	8.60996E-70	191.58

Figura 9. 106 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera de la viga 1

Con los datos anteriores es posible ver como en la viga 1 en el sentido longitudinal transversal existen diferencias significativas entre el sentido LT, con todos los otro LR, RR, RL, RT, TT, TL y TR, entre el sentido TR y LT, RL y RT también existen diferencias significativas, pero entre las otras caras no existen diferencias significativas (ver figura 9.107).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido LT, LR, RL RT, TL y TR						
Viga 1 (80%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-544.40	149.35	127.61	-6.84	-94.56
LT	544.40		693.75	672.01	537.55	449.84
RL	-149.35	-693.75		-21.74	-156.19	-243.91
RT	-127.61	-672.01	21.74		-134.46	-222.17
TL	6.84	537.55	156.19	134.46		-87.71
TR	94.56	449.84	243.91	222.17	87.71	

Figura 9. 107 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para la velocidad transversal

Los valores de la figura 9,108 nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras.

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
31.81	2.40582E-23	187.41

Figura 9. 108 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad transversal, para los sentidos de las muestras de madera de la viga 2

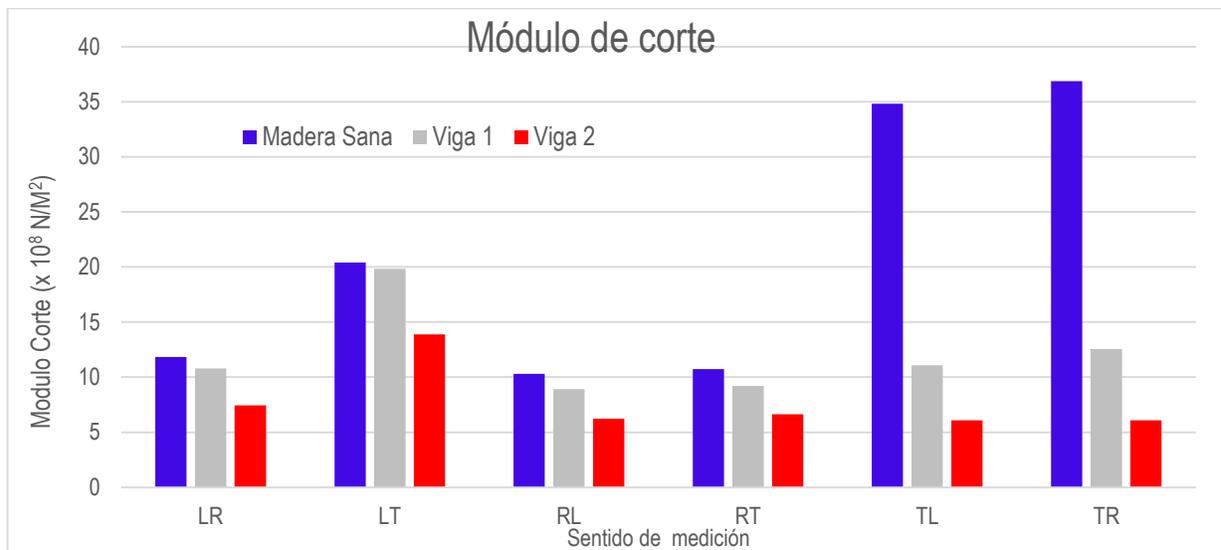
Las mediciones de la velocidad transversal en las muestras de madera de la viga 2, en el sentido LT existen diferencias significativas entre este con todos los otro LR, RR, RL, RT, TT, TL y TR, entre el sentido RT, LR y LT también existen diferencias significativas, pero entre las otras caras no existen diferencias significativas. (ver figura 9. 109).

Correlación de la Velocidad Transversal en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Viga 2 (40%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-534.24	126.73	244.03	142.92	142.62
LT	534.24		660.97	778.27	677.16	676.87
RL	-126.73	-660.97		117.31	16.20	15.90
RT	-244.03	-778.27	-117.31		-101.11	-101.41
TL	-142.92	677.16	-16.20	101.11		-0.30
TR	-142.62	676.87	-15.90	101.41	0.30	

Figura 9. 109 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 para la velocidad transversal

9.3.1 Módulo de Corte para la Onda transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.

El Módulo de Corte para la Onda transversal en el sentido transversal de las muestras sanas (TL y TR), es el que presenta los valores mayores. El sentido longitudinal transversal (LT) para los tres tipos de muestras observamos que los valores son más parecidos, pero menores a los registrados en el sentido transversal de las muestras sanas. Los valores más bajos los presento el sentido radial longitudinal (RL) ver figura 9.110.



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
LR	11.83	10.79	7.45
LT	20.41	19.83	13.87
RL	10.28	8.92	6.24
RT	10.72	9.19	6.64
TL	34.83	11.09	6.08
TR	36.88	12.54	6.07

Figura 9. 110 Resultados para el módulo de Corte, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR)

Los valores de F y de ρ , así como el resultado de las diferencias de medias permiten observar que la diferencia entre ellas es muy poca desde el punto de vista de la estadística (ver figura 9.111).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
67.61	5.51869E-13	143.32

Figura 9. 111 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos en las muestras de madera sana

Estos valores nos permiten determinar como en el módulo corte en las tres caras para las muestras sanas no existen diferencias significativas (ver figura 9.112).

Correlación del Módulo de Corte en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Madera Sana (100%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-8.58	1.55	1.11	-23.00	-25.05
LT	8.58		10.13	9.69	-14.42	-16.47
RL	-1.55	-10.13		-0.43	-24.54	-26.60
RT	-1.11	-9.69	0.43		-24.11	-26.17
TL	23.00	-14.42	24.54	24.11		-2.06
TR	25.05	-16.47	26.60	26.17	2.06	

Figura 9. 112 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para el módulo de corte

La tabla 9.113 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.113).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
106.47	1.17863E-52	4.94

Figura 9. 113 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos de las muestras de la viga 1

Con los datos anteriores es posible ver como en la viga 1 existen diferencias significativas entre el sentido LT y todos los demás LR, RL, RT, TL y TR, entre el sentido TR y LR, LT, RL, RT, y TL también existen diferencias significativas, pero entre las otras caras no existen diferencias significativas (ver figura 9.114).

Correlación del Módulo de Young en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Viga 1 (80%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-9.04	1.88	1.61	-0.29	10.15
LT	9.04		10.92	10.65	8.75	19.20
RL	-1.88	-10.92		-0.27	-2.17	8.28
RT	-1.61	-10.65	0.27		-1.90	8.55
TL	0.29	8.75	2.17	1.90		10.45
TR	-10.15	19.20	-8.28	-8.55	-10.45	

Figura 9. 114 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 para el módulo de corte

Los valores de la figura 9.115 nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras.

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
37.39	7.18548E-22	3.07

Figura 9. 115 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de corte, para los sentidos de las muestras de la viga 2

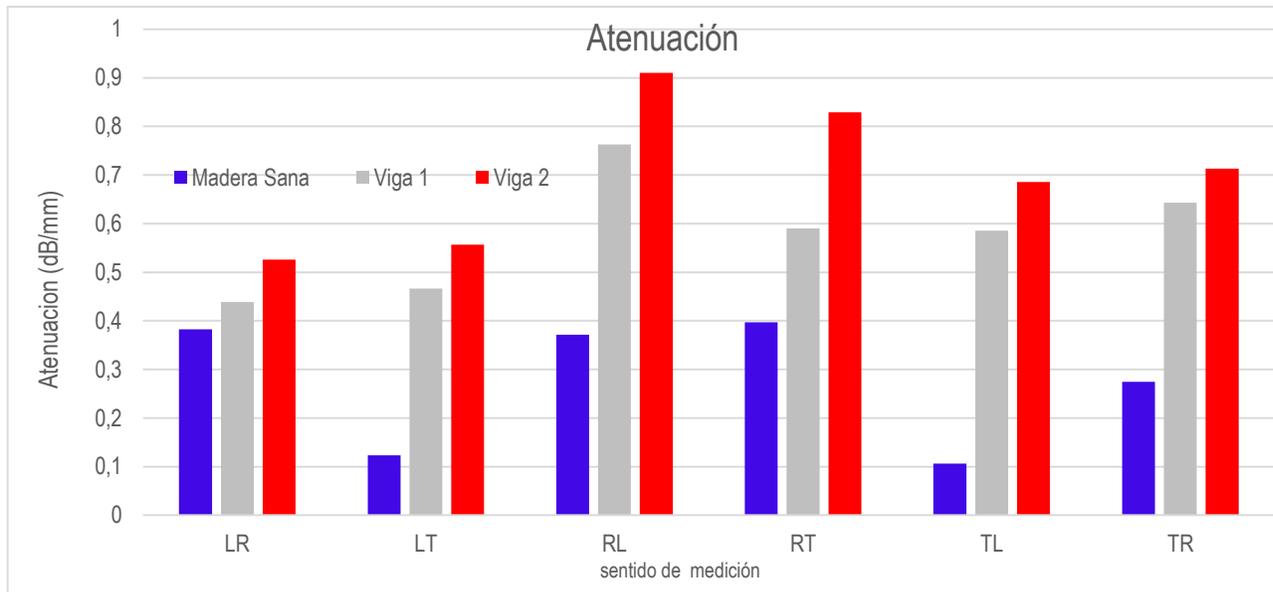
Las mediciones de la velocidad transversal en las muestras de madera de la viga 2, obtuvimos que el sentido LT existen diferencias significativas entre en este sentido y los otros LR, RL, R, TL y TR, pero no existen diferencias significativas en las combinaciones de los otros sentidos (ver figura 9.116).

Correlación del Módulo de Young en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Viga 2 (40%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-6.42	1.21	0.81	1.37	1.38
LT	6.42		7.63	7.24	7.79	7.81
RL	-1.21	-7.63		-0.40	0.16	0.17
RT	-0.81	-7.24	0.40		0.56	0.57
TL	-1.37	7.79	-0.16	-0.56		0.01
TR	-1.38	7.81	-0.17	-0.57	-0.01	

Figura 9. 116 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 el módulo de corte

9.3.2 Atenuación Ultrasónica para la Onda transversal para los sentidos LT, LR, RL, RT, TL y TR.

En la atenuación para la onda transversal en el sentido radial de las muestras de la viga 2 (RL y RT), se presentan los valores mayores. El sentido longitudinal transversal y transversal longitudinal (LT y TL) para las muestras sanas observamos que los valores son los más bajos, pero menores a los registrados de las muestras de las vigas 1 y 2 (ver figura 9.117). Esto debido a las características del material.



Tipo de madera	Madera Sana (100%)	Viga 1 (80%)	Viga 2 (40%)
LR	0.38	0.43	0.52
LT	0.12	0.46	0.55
RL	0.37	0.76	0.91
RT	0.39	0.58	0.82
TL	0.10	0.58	0.68
TR	0.27	0.64	0.71

Figura 9. 117 Resultados para la atenuación ultrasónica, para los tres tipos de madera en el sentido longitudinal (LT y LR), radial (RL y RT) y tangencial (TL y TR)

La siguiente tabla nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias, (ver figura 9.118).

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
62.40	5.74133E-38	1.61

Figura 9. 118 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los sentidos de las muestras de madera sana

Estos valores nos permiten determinar como la Atenuación en las tres caras para las muestras sanas nos indican que no existen diferencias significativas entre ninguno de los sentidos (ver figura 9.119).

Correlación de la Atenuación en el sentido LT, LR, RL RT, TL y TR						
Madera Sana (100%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		0.26	0.01	-0.01	0.28	0.11
LT	-0.26		-0.25	-0.27	0.02	-0.15
RL	-0.01	0.25		-0.03	0.27	0.10
RT	-0.01	-0.27	0.03		0.29	0.12
TL	-0.28	-0.02	-0.27	-0.29		-0.17
TR	-0.11	0.15	-0.10	-0.12	0.17	

Figura 9. 119 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera sana para la Atenuación

La tabla 9.117 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.120).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
18.09	1.30824E-14	0.13

Figura 9. 120 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para los sentidos de las muestras de madera sana.

Las mediciones de la atenuación con la utilización de la velocidad transversal en las muestras de madera de la viga 2, vemos que el sentido LR existen diferencias significativas entre todos los otros sentidos, RL, RT, TL y TR, excepto con el sentido LT y que el sentido RL en relación con todos los otros también existen diferencias LR, LT, RT y TL, entre RT y RT si existe diferencias y entre TL y RL también existen diferencias; en todas las otras combinaciones de los sentidos no existen diferencias significativas (ver figura 9.121).

Correlación de la Atenuación en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Viga 1 (80%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-0.03	-0.32	-0.15	-0.15	-0.20
LT	0.03		-0.30	-0.12	-0.12	-0.18
RL	0.32	0.30		0.17	0.18	0.12
RT	-0.15	-0.12	-0.17		0.00	-0.05
TL	0.15	0.12	-0.18	0.00		-0.06
TR	0.20	0.18	-0.12	0.05	0.06	

Figura 9. 121 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 1 la Atenuación

Los valores siguientes nos muestra el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, la cual es la más dañada de las tres muestras ver figura 9.122.

Valor de F	Valor de ρ	Prueba de Diferencia de Medias
10.71	4.62836E-09	0.15

Figura 9. 122 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de madera de la viga 2

La estadística nos permite ver que la atenuación en los sentidos LT y TL, no existen diferencias significativas tampoco entre RT y RL, en TL, LT, RT y TR, no existen diferencias significativas y finalmente entre TR y RT tampoco no existen diferencias significativas. En todos los otros sentidos y combinaciones si existen diferencias significativas (ver figura 9.123).

Correlación de la Atenuación en el sentido LT, LR, RL, RT, TL y TR						
Viga 2 (40%)	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LR		-0.03	-0.38	-0.30	-0.16	-0.19
LT	0.03		-0.35	-0.27	-0.13	-0.16
RL	0.38	0.35		0.08	0.22	0.20
RT	0.30	-0.27	-0.08		0.14	0.12
TL	0.16	0.13	-0.22	-0.14		-0.03
TR	0.19	0.16	-0.20	-0.12	0.03	

Figura 9. 123 Resultados de la relación entre las caras de las muestras de madera de la viga 2 en la Atenuación

9.4. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal.

En este punto se puede ver cómo interactúan entre si las mediciones realizadas para los distintos sentidos de los tres tipos de muestras antes nombradas como madera sana (100% sana), madera de la viga 1 (80% sana) y madera de la viga 2 (40% sana).

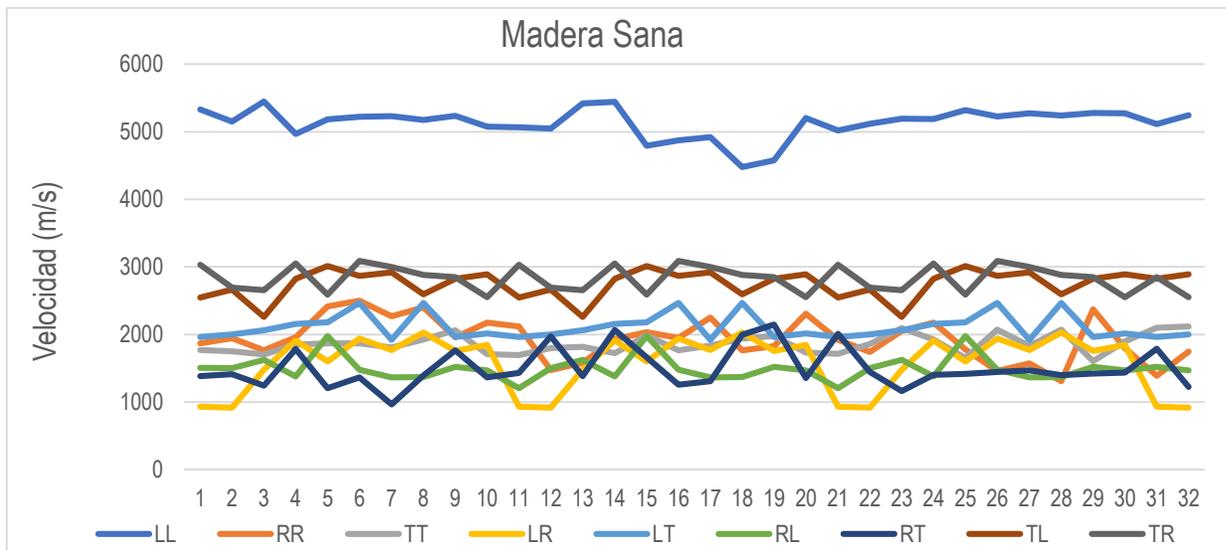
La onda longitudinal y la onda transversal presentan algunas diferencias entre sí, en las mediciones de las variables tomadas en cuenta para esta investigación, como son la velocidad, el Módulo de Young, el Módulo de Corte y la Atenuación Ultrasónica. Al comparar ambas ondas para cada una de las muestras (la madera sana, madera de la viga 1 y la madera de la viga 2) en los sentidos longitudinal(LL), radial(RR) y transversal (TT), con los sentidos longitudinal radial(LR), longitudinal transversal(LT), radial longitudinal(RL), radial transversal(RT), transversal longitudinal(TL) y transversal radial(TR). Es posible observar en cuál de los sentidos se presentan los valores más altos, cuáles son los más bajos y en qué tipo de onda obtenemos estos valores.

Al comparar estadísticamente los nueve sentidos medidos en cada muestra es posible saber cuáles de estos sentidos son estadísticamente diferentes y cuales son similares entre ellos. Esto con un análisis de varianza de un factor para determinar si existe diferencia entre las medias con un intervalo de confianza del 95% de probabilidad.

A continuación, se presentan las gráficas y tablas que nos permiten observar el comportamiento de estas variables y las dos velocidades para cada una de las muestras en sus nueve direcciones. Comenzando con la madera sana, después la viga 1 y finalmente los resultados de las mediciones para la viga 2.

9.4.1. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Madera Sana.

En la figura 9.124 y 9.125, podemos ver claramente como en la madera sana la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial



Madera Sana (100%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
5135.46	1931.49	1860.36	1574.39	2110.44	1498.53	1502.64	2747.69	2830.42

Figura 9. 124 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

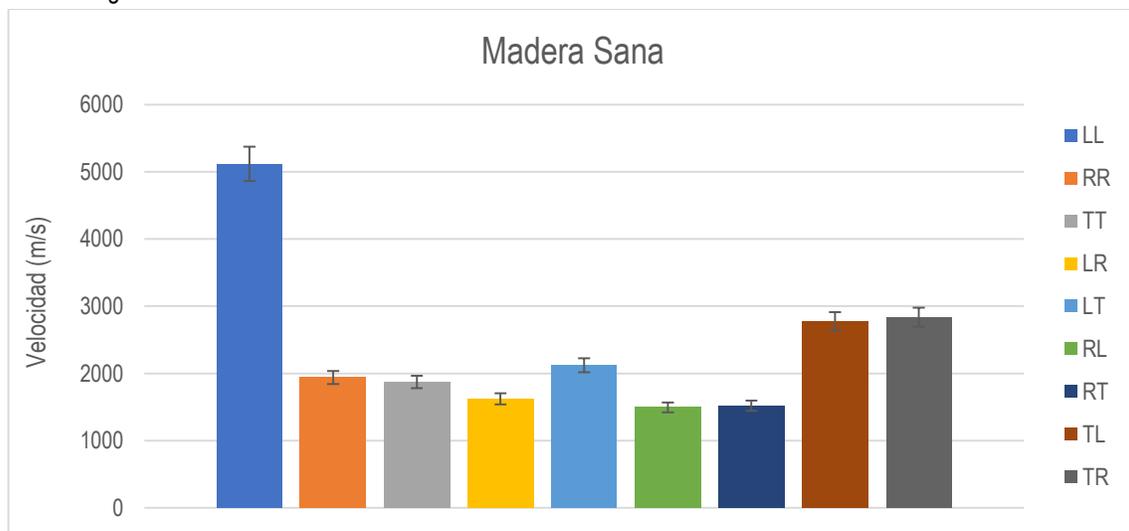


Figura 9. 125 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

La tabla 9.126 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera sana, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 1, (ver figura 9.126).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
670.00	3.0021E-177	164.59

Figura 9. 126 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera sana entre los nueve sentidos

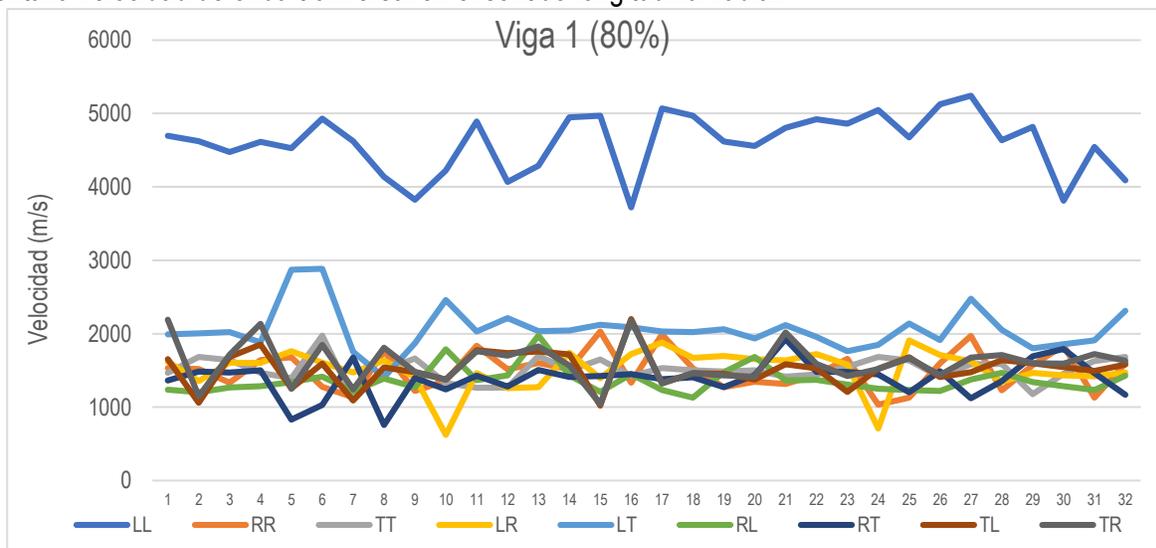
La estadística nos permite ver que la velocidad de onda longitudinal en el sentido RR y TT no existen diferencias significativas y en los sentidos RL, RT y LR tampoco existen diferencias significativas entre los sentido LR y RT, entre TL y TR, finalmente el sentido LL y LT no existen diferencias significativas. En todas las otras com binaciones si existen (ver figura 9.127).

Correlación de la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL, RT, TL y TR									
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		3203.97	3275.10	3561.07	3025.01	3636.93	3632.81	2387.77	2305.03
RR	-3203.97		71.13	357.10	-178.96	432.95	428.84	-816.20	-898.94
TT	-3275.10	-71.13		285.97	-250.09	361.83	357.71	-887.33	-970.07
LR	-3561.07	-357.10	-285.97		-536.06	75.85	71.74	-1173.30	-1256.04
LT	-3025.01	178.96	250.09	536.06		611.91	607.80	-637.24	-719.98
RL	-3636.93	-432.95	-361.83	-75.85	-611.91		-4.11	-1249.15	-1331.89
RT	-3632.81	-428.84	-357.71	-71.74	-607.80	4.11		-1245.04	-1327.78
TL	-2387.77	816.20	887.33	1173.30	637.24	1249.15	1245.04		-82.74
TR	-2305.03	898.94	970.07	1256.04	719.98	1331.89	1327.78	82.74	

Figura 9. 127 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

9.4.2. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Viga 1.

En la figura 9.128 y 9.129, podemos ver claramente como en la madera de la Viga 1 la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial.



Viga 1 (80%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
4604.73	1497.47	1509.92	1514.02	2058.42	1364.67	1386.41	1520.87	1608.58

Figura 9. 128 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1

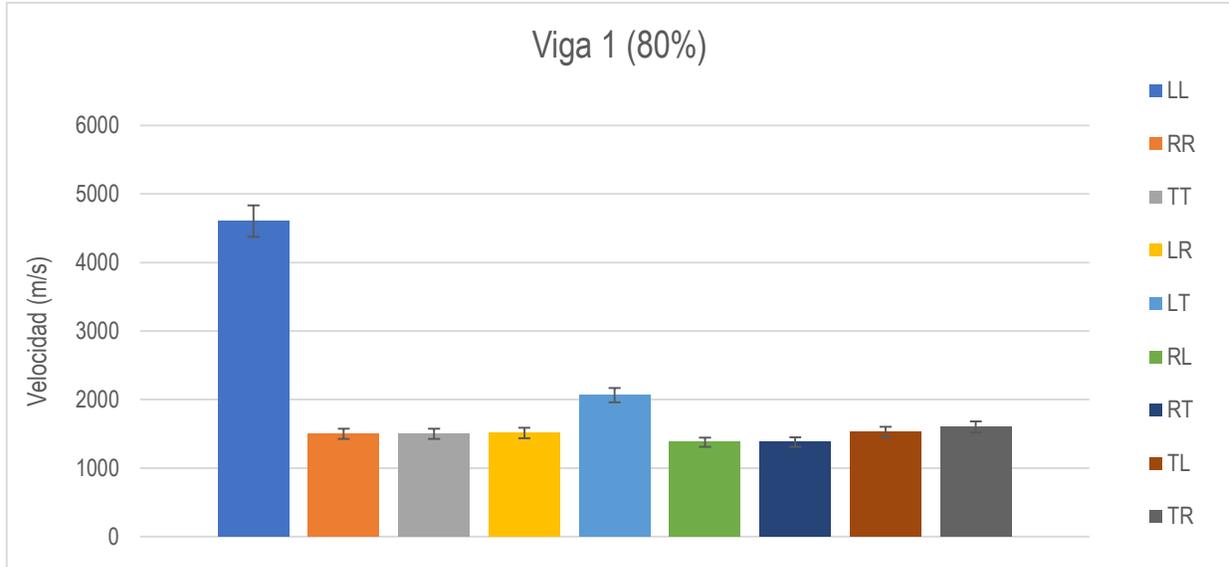


Figura 9. 129 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1

La tabla 9.130 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas (ver figura 9.130)

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
476.32	8.2284E-158	208.34

Figura 9. 130 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la velocidad longitudinal y la velocidad transversal, para las muestras de la viga 1 entre los nueve sentidos

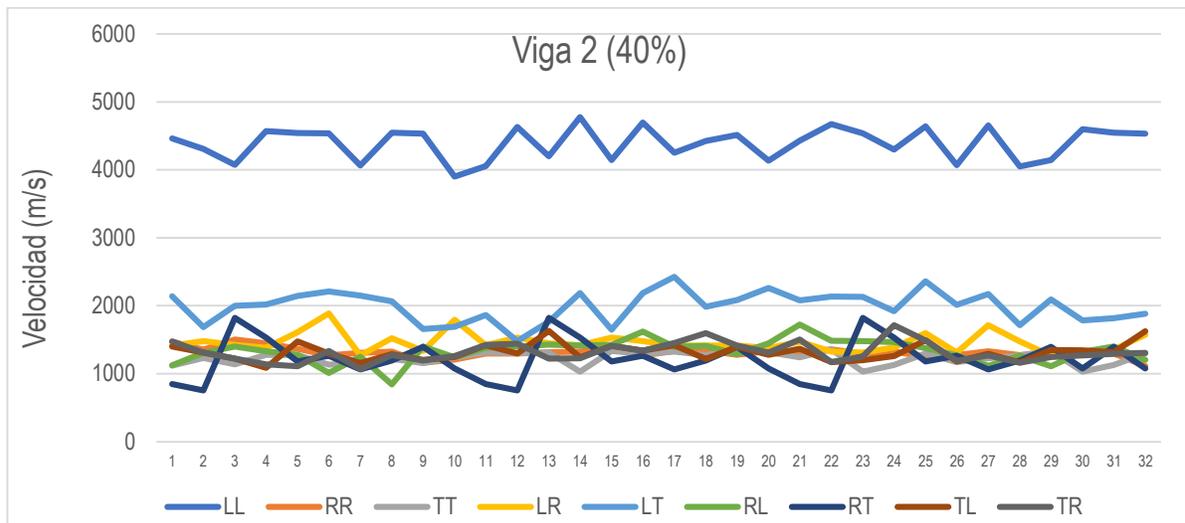
La estadística nos permite ver que la velocidad de onda longitudinal en el sentido LL y el sentido LT existen diferencias significativas con todos los otros sentidos y que entre los sentidos RL, RT y TR existen diferencias significativas. En todas las otras combinaciones no existen diferencias significativas (ver figura 9.131)

Correlación de la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL, RT, TL y TR									
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		3107.26	3094.81	3090.70	2546.31	3240.06	3218.32	3083.86	2996.15
RR	-3107.26		-12.45	-16.56	-560.95	132.79	111.06	-23.40	-111.11
TT	-3094.81	12.45		-4.11	-548.50	145.25	123.51	-10.95	-98.66
LR	-3090.70	16.56	4.11		-544.40	149.35	127.61	-6.84	-94.56
LT	-2546.31	560.95	548.50	544.40		693.75	672.01	537.55	449.84
RL	-3240.06	-132.79	-145.25	-108.31	-693.75		-21.74	-156.19	-243.91
RT	-3218.32	-111.06	-123.51	-127.61	-672.01	21.74		-134.46	-222.17
TL	-3083.86	23.40	10.95	6.84	-537.55	156.19	134.46		-87.71
TR	-2996.15	111.11	98.66	94.56	-449.84	243.91	222.17	87.71	

Figura 9. 131 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1

9.4.3. Comparación entre la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para la Viga 2.

En la figura 9.132 y 9.133, podemos ver claramente como en la madera de la viga 2 la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto como ocurre en los dos casos anteriores y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido radial transversal.



Viga 2 (40%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
4391.91	1313.48	1228.72	1458.33	1992.57	1331.60	1214.29	1315.41	1315.70

Figura 9. 132 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2

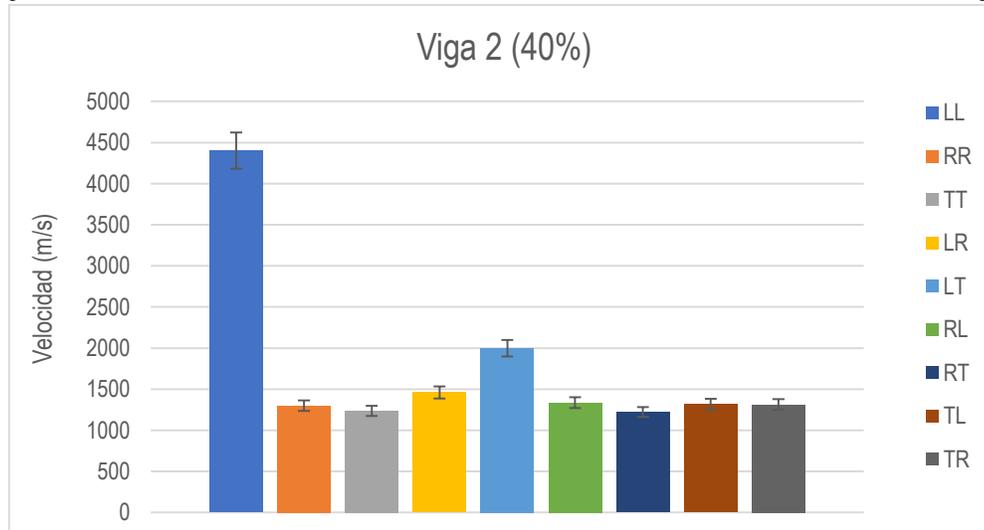


Figura 9. 133 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 2

La tabla 9.131 muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras de la viga 2, (ver figura 9.134).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
1009.97	4.4984E-201	141.73

Figura 9. 134 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para las velocidades longitudinal y transversal, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos

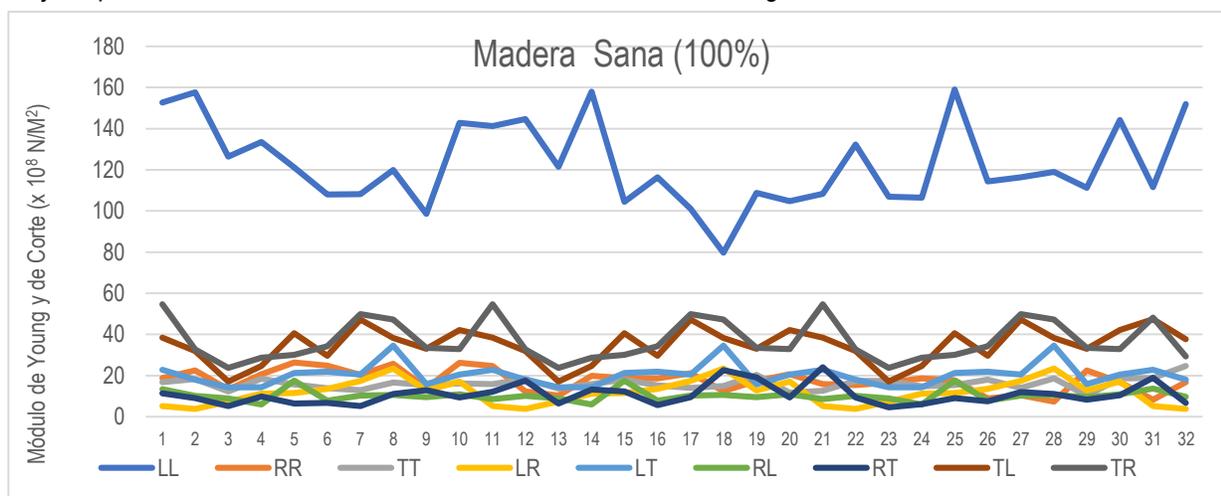
La estadística muestra que la velocidad de onda longitudinal en el sentido LL existen diferencias significativas en relación con todos los otros sentidos entre sí y en los sentidos LR y LT vemos que también existen diferencias significativas con los otros sentidos de las muestras, también los sentidos RL y RT existen diferencias significativas entre ellos. Todos los otros sentidos en estas muestras no existen diferencias significativas (ver figura 9.135).

Correlación de la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL, RT, TL y TR									
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		3078.43	3163.19	2933.58	2399.34	3060.31	3177.62	3076.50	3076.21
RR	-3078.43		84.76	-144.84	-679.09	-18.12	99.19	-1.92	-2.22
TT	-3163.19	-84.76		-229.61	-763.85	-102.88	14.42	-86.69	-86.98
LR	-2933.58	144.84	229.61		-534.24	126.73	244.03	142.92	142.62
LT	-2399.34	679.09	763.85	534.24		660.97	778.27	677.16	676.87
RL	-3060.31	18.12	102.88	-239.62	-660.97		117.31	16.20	15.90
RT	-3177.62	-99.19	-14.42	-244.03	-778.27	-117.31		-101.11	-101.41
TL	-3076.50	1.92	86.69	-142.92	-677.16	-16.20	101.11		-0.30
TR	-3076.21	2.22	86.98	-142.62	-676.87	-15.90	101.41	0.30	

Figura 9. 135 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera en la viga 2

9.4.4. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Madera Sana.

En la figura 9.136 y 9.137, podemos ver claramente como en la madera sana en el módulo Young, la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial.



Madera Sana (100%)									
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR	
122.86	17.63	16.10	11.83	20.41	10.29	10.72	34.83	36.89	

Figura 9. 136 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

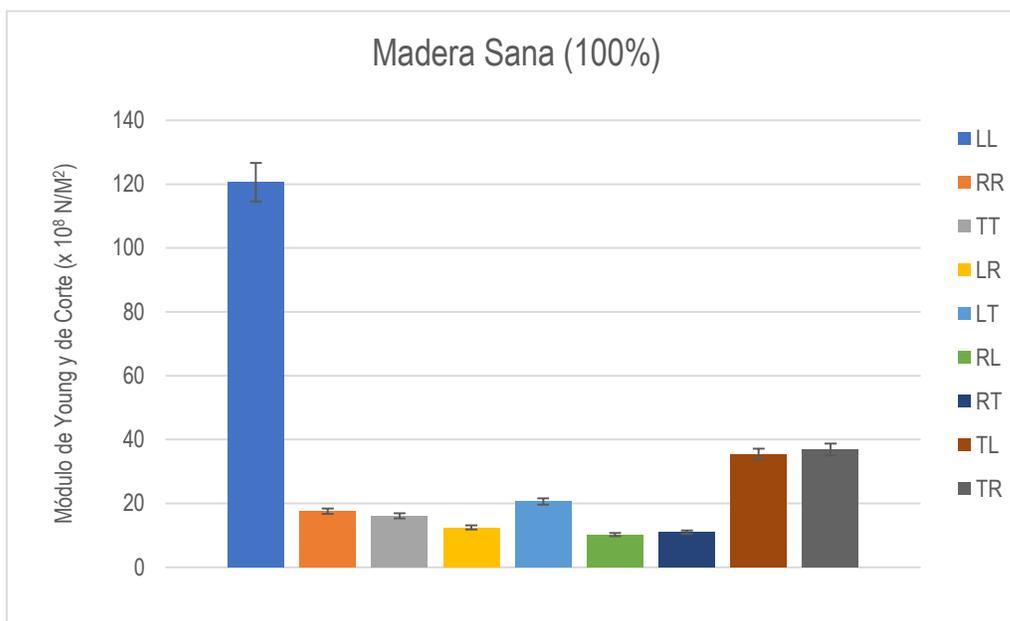


Figura 9. 137 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera sana, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas para las muestras, (ver figura 9.138).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
92.18	2.3315E-65	4.81

Figura 9. 138 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias de la madera sana para el módulo de Young y el módulo de Corte

La estadística deja ver que el Módulo de Young en el sentido RR y TT entre sí existen diferencias significativas y con el módulo de Corte en los sentidos LR y LR vemos que también existen diferencias significativas entre sí, al igual que el sentido LR y RT existen estadísticamente diferencias entre ellos y se repite esto en los sentidos TL y TR. Pero el sentido TT y LR no existen diferencias significativas en relación con todos los otros. Mientras que en todos los demás no existen diferencias significativas entre sí (ver figura 9.139).

Correlación del Módulo de Young y el Módulo de Corte en el sentido LL, RR, TT, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		105.23	106.77	111.03	102.45	112.57	112.14	88.03	85.97
RR	-105.23		1.53	5.79	-2.79	7.34	6.91	-17.20	-19.26
TT	-106.77	-1.53		4.26	-4.32	5.81	5.37	-18.74	-20.79
LR	-111.03	-5.79	-4.26		-8.58	1.55	1.11	-23.00	-25.05
LT	-102.45	2.79	4.32	8.58		10.13	9.69	-14.42	-16.47
RL	-112.57	-7.34	-5.81	-1.55	-10.13		-0.43	-24.54	-26.60
RT	-112.14	-6.91	-5.37	-1.11	-9.69	0.43		-24.11	-26.17
TL	-88.03	17.20	18.74	23.00	14.42	24.54	24.11		-2.06
TR	-85.97	19.26	20.79	25.05	16.47	26.60	26.17	2.06	

Figura 9. 139 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana para el módulo de Young y el de Corte

9.4.5. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Viga 1.

En la figura 9.140 y 9.141, se ve claramente como en la madera de la viga 1 el módulo de Young en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo para el módulo de Corte lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido Tangencial radial.

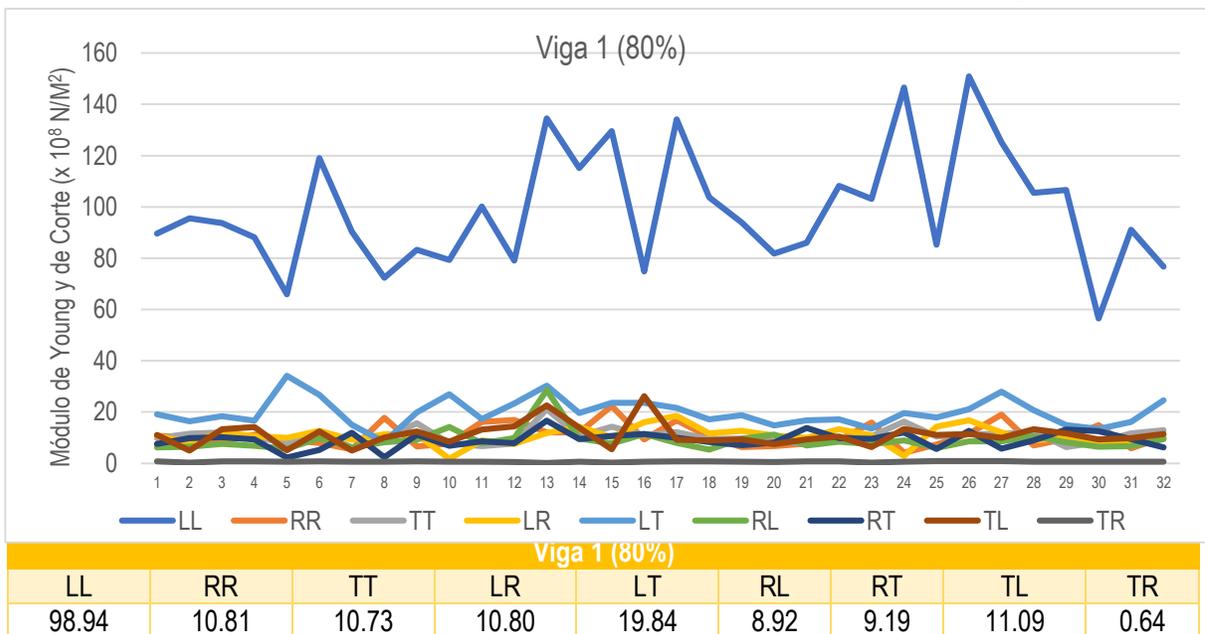


Figura 9. 140 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1 para el módulo de Young y el módulo de Corte

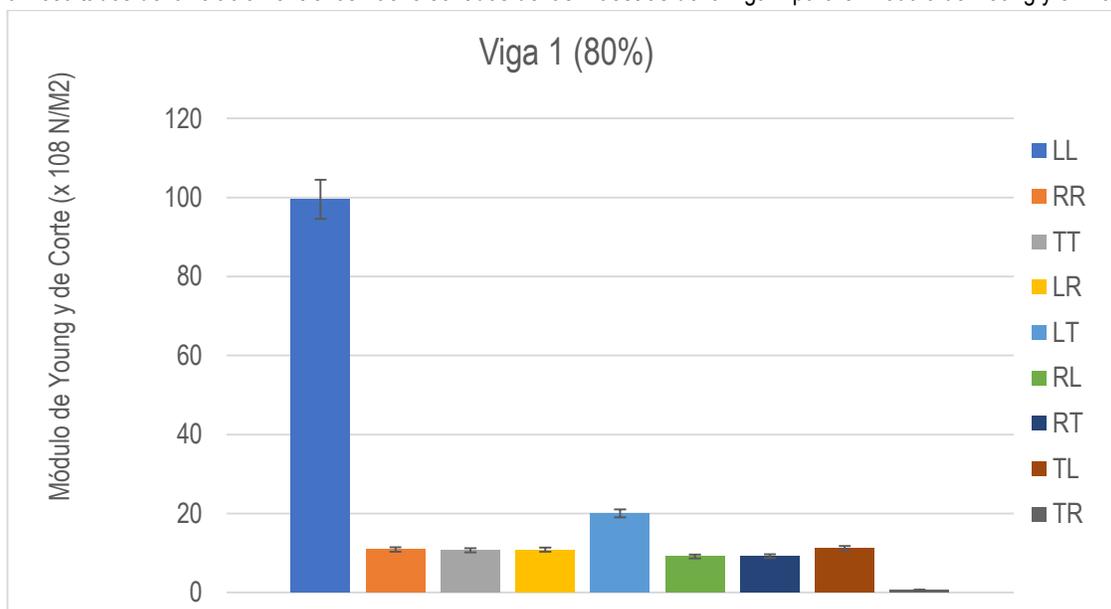


Figura 9. 141 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1 para el módulo de Young y el módulo de Corte

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de p y la diferencia de medias (ver figura 9.142).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
393.46	4.0911E-147	6.63

Figura 9. 142 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para el módulo de Young y el de Corte, para las muestras de la madera de la viga 1 entre los nueve sentidos

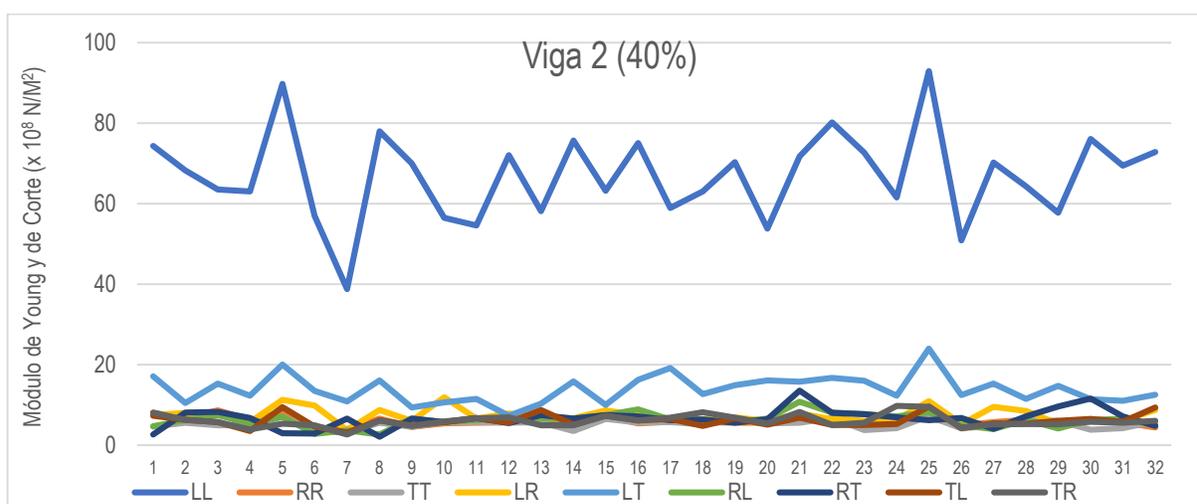
La tabla siguiente muestra como el módulo de Young en el sentido LL existen diferencias significativas con todos los otros sentidos y el módulo de Corte en los sentidos LT y TR vemos que también existen diferencias significativas con todos los demás. Mientras que todos los otros sentidos no existen diferencias significativas en relación con todos los otros (ver figura 9.143).

Correlación del Módulo de Young y el N Módulo de Corte en el sentido LL, RR, TT, LR, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		88.13	88.21	88.14	79.10	90.02	89.75	87.85	98.30
RR	-88.13		0.08	0.01	-9.03	1.89	1.62	-0.29	10.16
TT	-88.21	-0.08		-0.07	-9.11	1.81	1.54	-0.36	10.09
LR	-88.14	-0.01	0.07		-9.04	1.88	1.61	-0.29	10.15
LT	-79.10	9.03	9.11	9.04		10.92	10.65	8.75	19.20
RL	-90.02	-1.89	-1.81	-1.03	-10.92		-0.27	-2.17	8.28
RT	-89.75	-1.62	-1.54	-1.61	-10.65	0.27		-1.90	8.55
TL	-87.85	0.29	0.36	0.29	-8.75	2.17	1.90		10.45
TR	-98.30	-10.16	-10.09	-10.15	-19.20	-8.28	-8.55	-10.45	

Figura 9. 143 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1

9.4.6. Comparación entre el Módulo de Young y el Módulo de Corte, para la Viga 1.

En la figura 9.144 y 9.145, podemos ver claramente como en la madera de la viga 2 el módulo de Young en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo para el módulo de Corte lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido Radial Tangencial.



Viga 2 (40%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
67.03	5.99	5.27	7.45	13.88	6.24	6.64	6.08	6.07

Figura 9. 144 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2

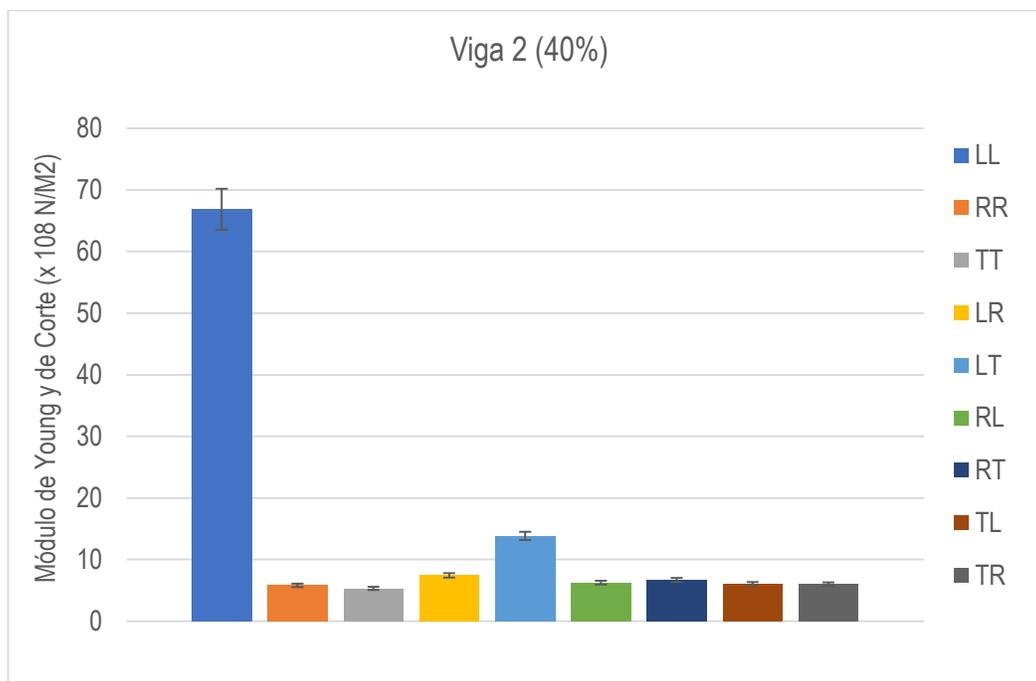


Figura 9. 145 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 2

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la viga 2, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas, (ver figura 9.146).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
753.78	4.791E-184	3.22

Figura

9. 146 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias entre el módulo de Young y el de corte, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos

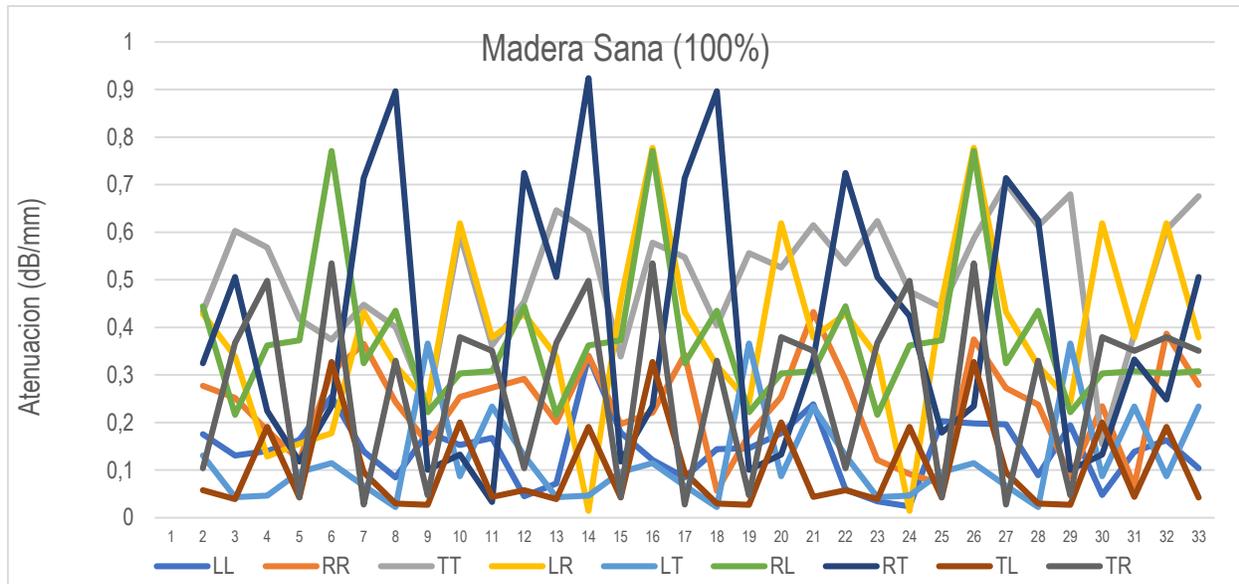
La estadística muestra en la tabla siguiente como el módulo de Young en el sentido LL existen diferencias significativas con todos los otros sentidos y el módulo de Corte en los sentidos LT vemos que también existen diferencias significativas en relación con todos los demás. Mientras que todos los otros sentidos no existen diferencias significativas en relación con todos los demás (ver figura 9.147).

Correlación del Módulo de Young y el Módulo de Corte en el sentido LL, RR, TT, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		61.04	61.76	59.57	53.15	60.79	60.39	60.95	60.96
RR	-61.04		0.73	-1.46	-7.88	-0.25	-0.65	-0.09	-0.08
TT	-61.76	-0.73		-2.19	-8.61	-0.98	-1.37	-0.82	-0.80
LR	-59.57	1.46	2.19		-6.42	1.21	0.81	1.37	1.38
LT	-53.15	7.88	8.61	6.42		7.63	7.24	7.79	7.81
RL	-60.79	0.25	0.98	-2.51	-7.63		-0.40	0.16	0.17
RT	-60.39	0.65	1.37	-0.81	-7.24	0.40		0.56	0.57
TL	-60.95	0.09	0.82	-1.37	-7.79	-0.16	-0.56		0.01
TR	-60.96	0.08	0.80	-1.38	-7.81	-0.17	-0.57	-0.01	

Figura 9. 147 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2

9.4.7. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Madera Sana.

En la figura 9.148 y 9.149, es posible ver claramente como en la madera sana la Atenuación provocada con la velocidad de onda transversal de medición, en el sentido radial tangencial de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo de la Atenuación lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial.



Madera Sana (100%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
0.14	0.23	0.51	0.38	0.12	0.37	0.40	0.11	0.27

Figura 9. 148 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

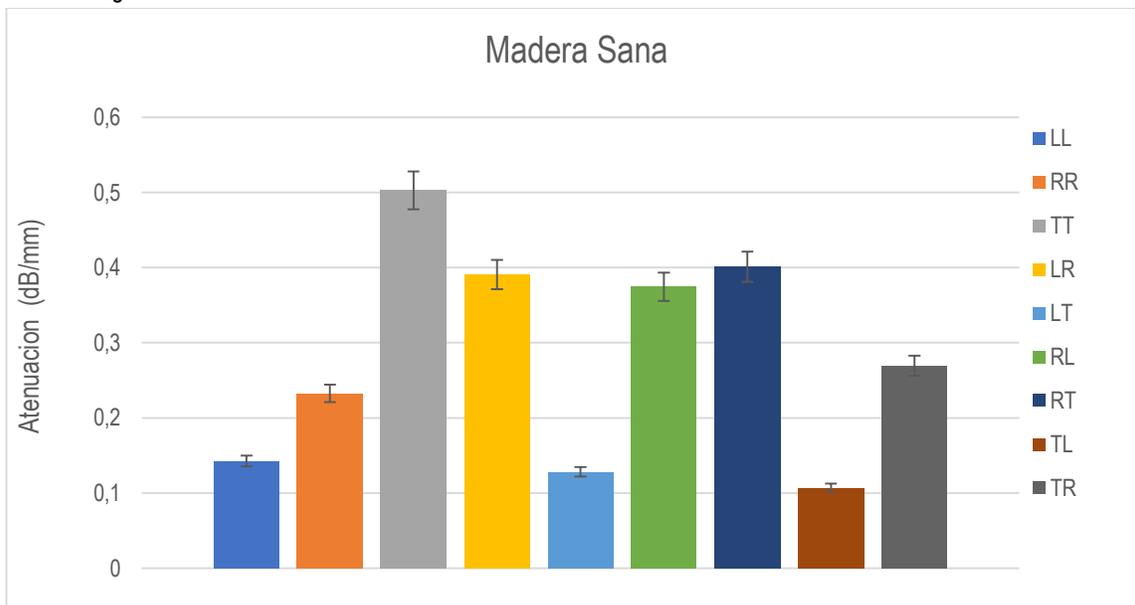


Figura 9. 149 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la madera sana

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera sana, obteniendo el valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias obtenidas (ver figura 9.150).

Valor de F	Valor de ρ	Diferencia de Medias
23.69	1.4814E-24	0.13

Figura 9. 150 Resultados del valor de F, el valor de ρ y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera sana entre los nueve sentidos

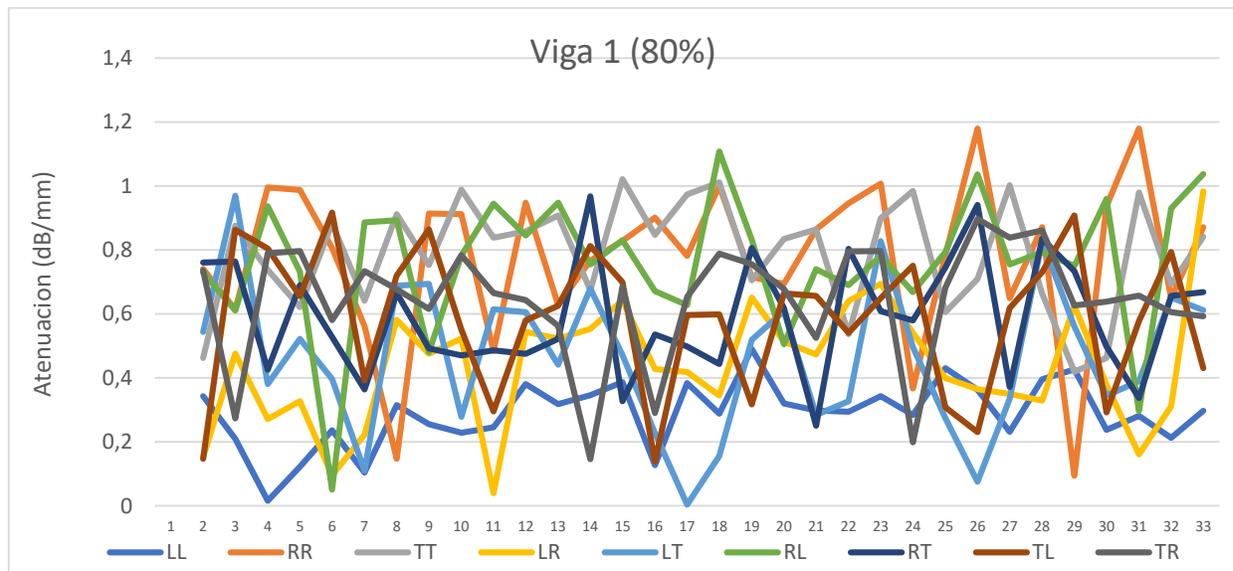
La estadística nos permite ver la atenuación ultrasónica que en la velocidad de onda longitudinal en el sentido LL encontramos que existen diferencias significativas con los sentidos TT, LR, RL y RT, pero no existen diferencias significativas con los otros sentidos. El sentido RR presenta diferencias significativas con los sentidos TT, LR y RT y no existen diferencias significativas con todos los otros. El sentido TT muestra que existen diferencias significativas entre los sentidos LL, RR, LT, TL y TR y que no existen diferencias significativas con los otros sentidos y la atenuación ultrasónica con la velocidad de onda transversal; el sentido RL existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, LT y RT, vemos que no existen diferencias significativas con los otros sentidos entre sí. El sentido LT, existen diferencias significativas entre los sentidos TT, LR, RL, RT y TR, pero que no existen diferencias significativas entre los otros sentidos. Los sentidos RL y RT existen diferencias significativas entre los sentidos LL, RR, LT, y TL, pero que no existen diferencias significativas a los otros. El sentido TL tiene diferencias significativas entre los sentidos TT, LR, RL, RT y TL y que no existen diferencias significativas entre los otros sentidos. Y finalmente que en el sentido TR existen diferencias significativas entre los sentidos TT, LT y TL y que no existen diferencias significativas entre los otros sentidos (ver figura 1.151).

Correlación de la Atenuación Ultrasónica entre la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Madera Sana (100%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		-0.09	-0.36	-0.24	0.02	-0.23	-0.25	0.04	-0.13
RR	0.09		-0.27	-0.15	0.11	-0.14	-0.16	0.13	-0.04
TT	0.36	0.27		0.12	0.38	0.13	0.11	0.40	0.23
LR	0.24	0.15	-0.12		0.26	0.01	-0.01	0.28	0.11
LT	-0.02	-0.11	-0.38	-0.26		-0.25	-0.27	0.02	-0.15
RL	0.23	0.14	-0.13	-0.01	0.25		-0.03	0.27	0.10
RT	0.25	0.16	-0.11	0.01	0.27	0.03		0.29	0.12
TL	-0.04	-0.13	-0.40	-0.28	-0.02	-0.27	-0.29		-0.17
TR	0.13	0.04	-0.23	-0.11	0.15	-0.10	-0.12	0.17	

Figura 9. 151 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 1

9.4.8. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Viga 1.

En la figura 9.152 y 9.153, podemos ver claramente como en la madera de la viga 1, la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido Radial de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal transversal.



Viga 1 (80%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
0.29	0.78	0.79	0.44	0.47	0.76	0.59	0.59	0.64

Figura 9. 152 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1

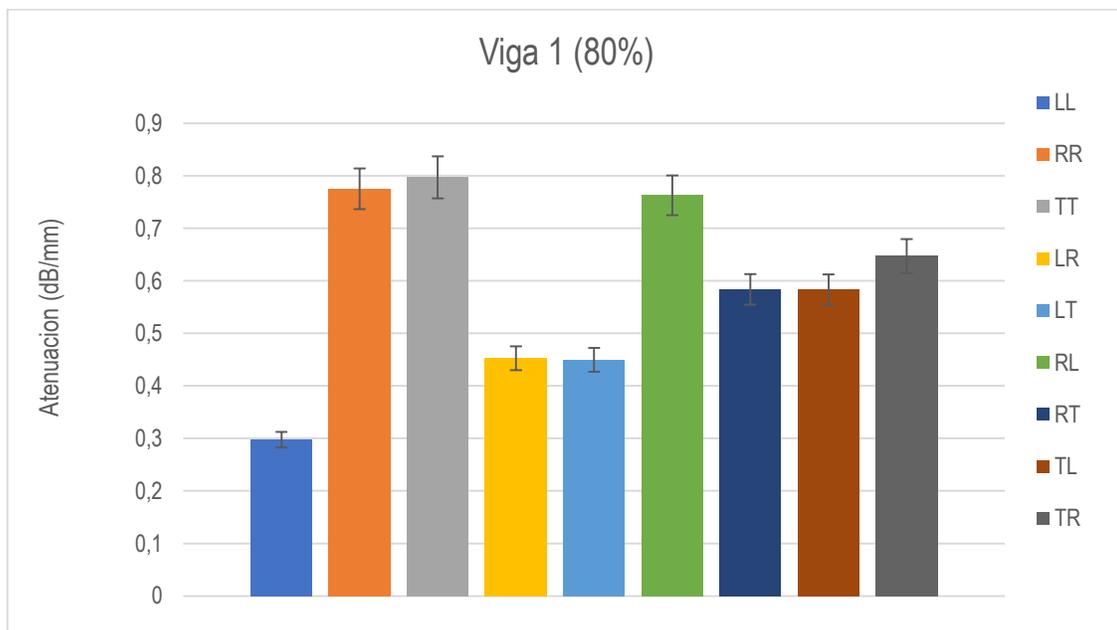


Figura 9. 153 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera de la viga 1, obteniendo el valor de F, el valor de p y la diferencia de medias obtenidas (ver figura 9.154).

Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias
23.88	8.18541E-28	0.15

Figura 9. 154 Resultados del valor de F, el valor de p y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera de la viga 1 entre los nueve sentidos

La estadística nos muestra que la atenuación ultrasónica que en la velocidad de onda longitudinal en el sentido LL encontramos que existen diferencias significativas con todos los otros sentidos, excepto con el sentido LR con el cual no existen diferencias significativas entre sí. El sentido RR existen diferencias significativas con los sentidos LL, LR, LT, RT y TL y que no existen diferencias significativas con los otros.

El sentido TT muestra que existen diferencias significativas entre los sentidos LL, LR, LT, RT y TL y que no existen diferencias significativas con los otros sentidos y la atenuación ultrasónica con la velocidad de onda transversal el sentido RL existen diferencias significativas con los sentidos RR, TT, RL y TR, vemos que no existen diferencias significativas con los otros sentidos entre sí.

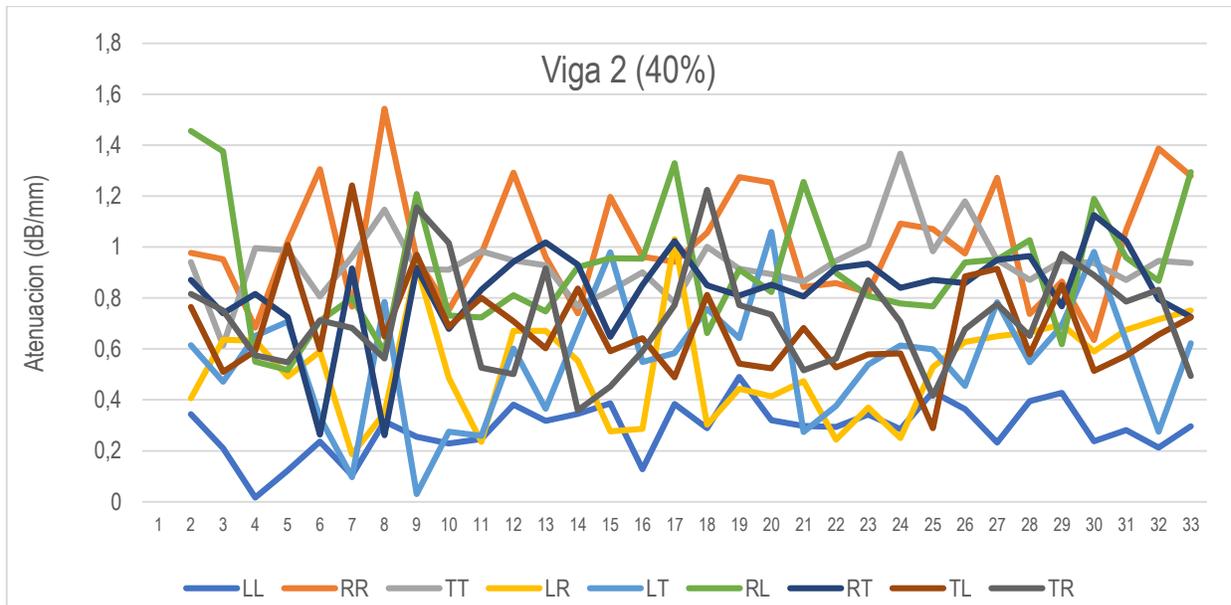
El sentido LT, existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, TT, RL y TR, pero que no existen diferencias significativas entre los otros sentidos. EL sentido RL existen diferencias significativas con los sentidos LL, LR, LT, RT y TL, pero que no existen diferencias significativas con los otros. Los sentidos RT y TL, existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, TT y RL, pero que no existen diferencias significativas con los otros. El sentido TR existen diferencias significativas con los sentidos LL, LR y LT y que no existen diferencias significativas con los otros sentidos (ver figura 9.155).

Correlación de la Atenuación Ultrasónica entre la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Viga 1 (80%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		-0.49	-0.50	-0.15	-0.18	-0.47	-0.30	-0.30	-0.35
RR	0.49		-0.01	0.34	0.31	0.01	0.19	0.19	0.13
TT	0.50	0.01		0.35	0.32	0.03	0.20	0.20	0.14
LR	0.15	-0.34	-0.35		-0.03	-0.32	-0.15	-0.15	-0.20
LT	0.18	-0.31	-0.32	0.03		-0.30	-0.12	-0.12	-0.18
RL	0.47	-0.01	-0.03	-0.22	0.30		0.17	0.18	0.12
RT	0.30	-0.19	-0.20	0.15	0.12	-0.17		0.00	-0.05
TL	0.30	-0.19	-0.20	0.15	0.12	-0.18	0.00		-0.06
TR	0.35	-0.13	-0.14	0.20	0.18	-0.12	0.05	0.06	

Figura 9. 155 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la viga 1

9.4.9. Comparación entre la Atenuación con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal, para los 9 sentidos de la Viga 2.

En la figura 9.156 y 9.157, podemos ver claramente como en la madera de la viga 2 la Atenuación medida con la velocidad de onda longitudinal, en el sentido radial de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo de la Atenuación lo presenta la velocidad de onda longitudinal en el sentido longitudinal de la muestra.



Viga 2 (40%)								
LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
0.29	1.02	0.94	0.53	0.56	0.91	0.83	0.69	0.71

Figura 9. 156 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 2

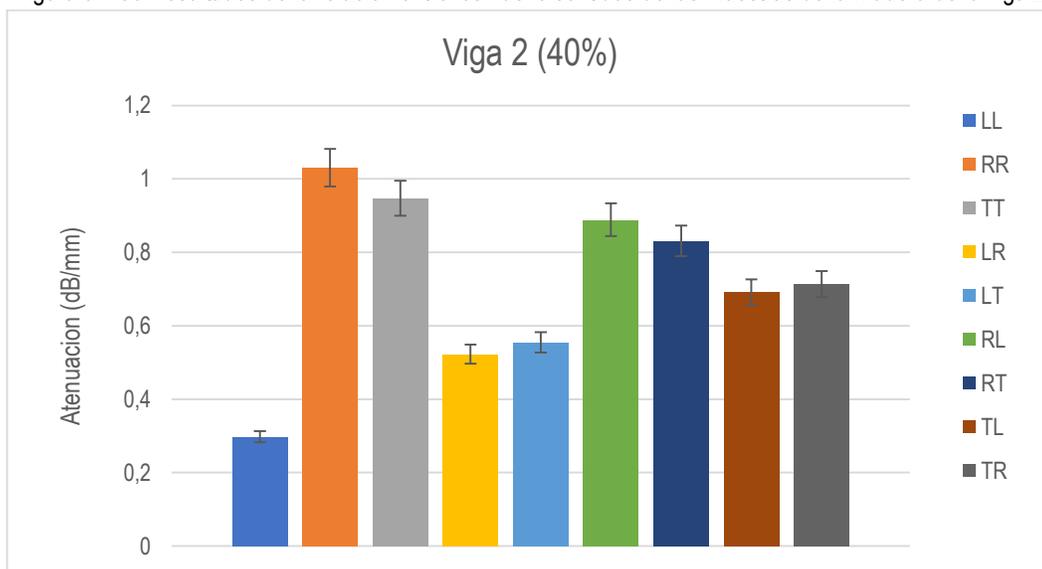


Figura 9. 157 Resultados de la relación entre los promedios de los nueve sentidos de las muestras de la viga 1

La tabla muestra el resultado del análisis estadístico de los datos de las muestras de la madera de la viga 2, obteniendo el valor de F, el valor de p y la diferencia de medias obtenidas (ver figura 9.158).

Valor de F	Valor de r	Diferencia de Medias
44.93	5.9842E-46	0.15

Figura 9. 158 Resultados del valor de F, el valor de p y la diferencia de medias para la Atenuación, para las muestras de la madera de la viga 2 entre los nueve sentidos

La estadística nos muestra la atenuación ultrasónica medida con la velocidad de onda longitudinal en el sentido LL encontramos que existen diferencias significativas con todos los otros sentidos. El sentido RR existen diferencias significativas con los sentidos LL, LR, LT, RT, TL y TR, y que no existen diferencias significativas con RR y RL.

El sentido TT muestra que existen diferencias significativas entre los sentidos LL, LR, LT, TL y TR, pero que no existen diferencias significativas con los otros sentidos. La atenuación ultrasónica con la velocidad de onda transversal el sentido RL existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, TT, RT, TL y TR, vemos que no existen diferencias significativas con los otros sentidos LT y RL. El sentido LT, existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, TT, RL, RT y TR, pero que no existen diferencias significativas entre los otros sentidos.

EL sentido RL existen diferencias significativas con los sentidos LL, LR, LT y TL, pero que no existen diferencias significativas con los otros. Los sentidos RT existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, LR y LT, pero que no existen diferencias significativas con los otros.

El sentido TL existen diferencias significativas con los sentidos LL, RR, TT, LR y RL y que no existen diferencias significativas con los otros sentidos. Y finalmente el sentido TR es existen diferencias significativas a los sentidos LL, RR, TT, LR, LT y RL, pero que no existen diferencias significativas sentido RT y TL (ver figura 9.159).

Correlación de la Atenuación Ultrasónica entre la velocidad Longitudinal y la velocidad Transversal en los sentidos LL, RR, TT, LT, LR, RL RT, TL y TR									
Viga 2 (40%)	LL	RR	TT	LR	LT	RL	RT	TL	TR
LL		-0.73	-0.65	-0.24	-0.27	-0.62	-0.54	-0.40	-0.43
RR	0.73		0.08	0.49	0.46	0.11	0.19	0.33	0.30
TT	0.65	-0.08		0.41	0.38	0.03	0.11	0.25	0.23
LR	0.24	-0.49	-0.41		-0.03	-0.38	-0.30	-0.16	-0.19
LT	0.27	-0.46	-0.38	0.03		-0.35	-0.27	-0.13	-0.16
RL	0.62	-0.11	-0.03	0.16	0.35		0.08	0.22	0.20
RT	0.54	-0.19	-0.11	0.30	0.27	-0.08		0.14	0.12
TL	0.40	-0.33	-0.25	0.16	0.13	-0.22	-0.14		-0.03
TR	0.43	-0.30	-0.23	0.19	0.16	-0.20	-0.12	0.03	

Figura 9. 159 Resultados de la relación entre los nueve sentidos de las muestras de la madera de la viga 8.8 Gráficas de las mediciones efectuadas con la Velocidad de onda Longitudinal y la Velocidad de onda Transversal para cada tipo de madera en cada uno de los sentidos

9.5 Relación de la Atenuación Ultrasónica entre la Velocidad Longitudinal y la Velocidad Transversal y el Número de Anillos.

Al observar el comportamiento de la Atenuación en las muestras, los resultados con las velocidades longitudinal y transversal en los nueve sentidos de medición; fue necesario comparar el número de anillos de las distintas muestras. La comparación de los promedios del número de anillos y de la pérdida de velocidad en los materiales nos demuestra que su estructura anatómica es un factor importante que considerar en la pérdida de energía de la onda inducida por los dos tipos de transductores empleados para la caracterización de los tres tipos de madera sana, viga 1 y viga 2.

La siguiente grafica muestra como el promedio de las mediciones de la atenuación ultrasónica está influenciada también con el promedio del número de anillos de las muestras de madera sana, madera de la viga 1 y la madera de la viga 2. Se observa que la mayor atenuación ocurre con la velocidad longitudinal en la madera de la viga 2 en el sentido RR y que la madera sana es la que presenta los valores más bajos de atenuación con la velocidad transversal en el sentido TL.

Sin importar el sentido que analicemos ni el tipo de onda utilizada en las mediciones, se observa que siempre serán más altos los valores de la viga 2 y los más bajos los de la madera sana, en la atenuación, ver figura 9.160.

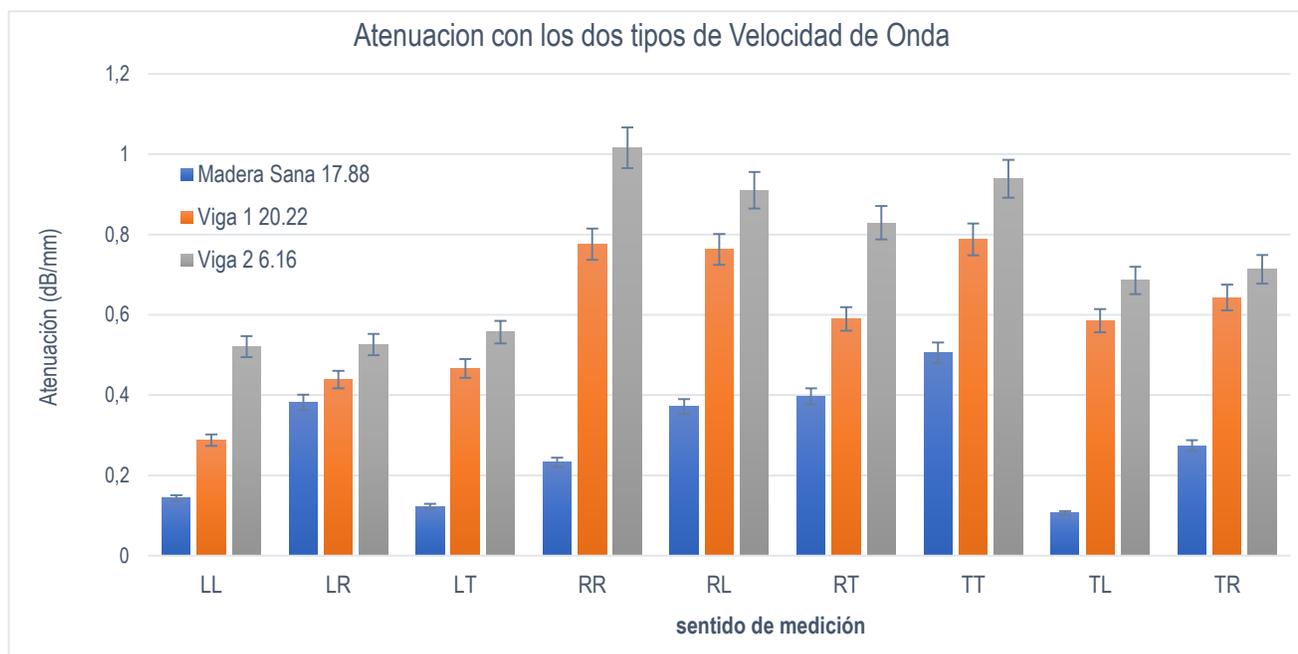


Figura 9. 160 Resultados de los promedios para la Atenuación con la velocidad longitudinal y la velocidad transversal y el número de anillos, en los tres tipos de muestras

9. 6 Anatomía de las muestras de madera sana, viga y viga 2.

Una vez concluidas todas las mediciones ultrasónicas y obtenidas las variables de Velocidad Longitudinal, Velocidad Transversal, Módulo de Young, Módulo de Corte y la Atenuación Ultrasónica; al finalizar los análisis estadísticos de estas variables para los tres tipos de material en los nueve sentidos de medición. Se considero la posibilidad de realizar pruebas destructivas de bajo impacto en las tres maderas para poder corroborar que estos resultados están relacionados directamente con la anatomía y las condiciones de los materiales.

La técnica de ultrasonido de emisión transmisión es una técnica volumétrica ya que interactúa con el material en sus tres dimensiones y 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 24 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 $V_t=1401 \text{ m/seg.} = 1401 \text{ m/seg}/ 0.5 \times 10^6 \text{ 1/ seg} = 2.8 \text{ mm}$ **$n=1.9 \text{ mm}$**

Las pruebas destructivas que se efectuaron fueron la obtención de cubos para el microscopio electrónico de barrido, cortes histológicos para el microscopio óptico y obtención de material dissociado. Estos tres tipos de pruebas destructivas son de bajo impacto al momento de analizar materiales de las dimensiones que presentan las vigas del estudio. Los siguientes puntos muestran los resultados obtenidos de las pruebas destructivas ya mencionadas, las cuales permiten apoyar los resultados las mediciones ultrasónicas.

9.6.1 Imágenes Microscópicas de las muestras de la Madera Sana, de la madera de la Viga 1 y la madera de la Viga 2.

Las tres maderas (madera sana, viga 1 y viga 2) fueron sometidas a un tratamiento previo para poder ser observadas en el microscopio. Las fotos obtenidas por el microscopio electrónico de barrido fueron tomadas en los tres sentidos principales de la madera (sentido longitudinal, sentido radial y sentido tangencial).

Se decidió tomar imágenes de las áreas totales de cada cara de las muestras a un aumento de 2000 μm . en este aumento no es posible observar la estructura anatómica de las tres muestras; por este motivo se procedió a tomar cuatro imágenes de cada cómo se observa en la figura 9.161. Esta imagen es de la Muestra sana corte transversal.

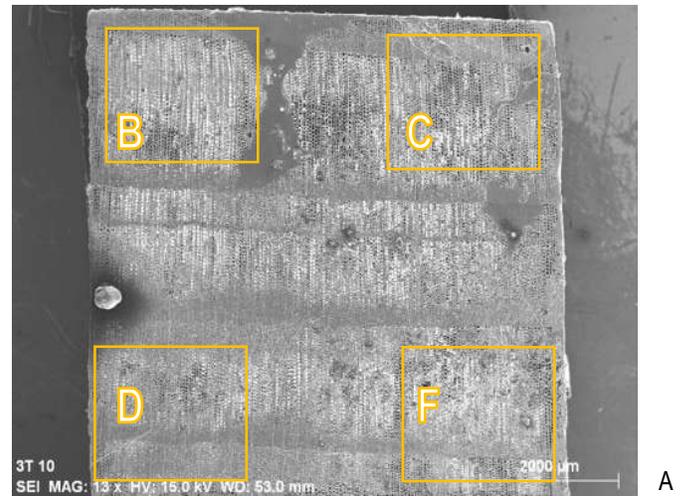


Figura 9. 161 (A) Muestra de madera sana corte transversal a 2000 μm

En la figura 9.162 es posible ver los lúmenes de la muestra de la madera sana en su corte transversal a 100 μm , en ellas es posible observar las condiciones en las que esta madera se encuentra. Su estructura presenta las características anatómicas normales de una madera de pino en óptimas condiciones.

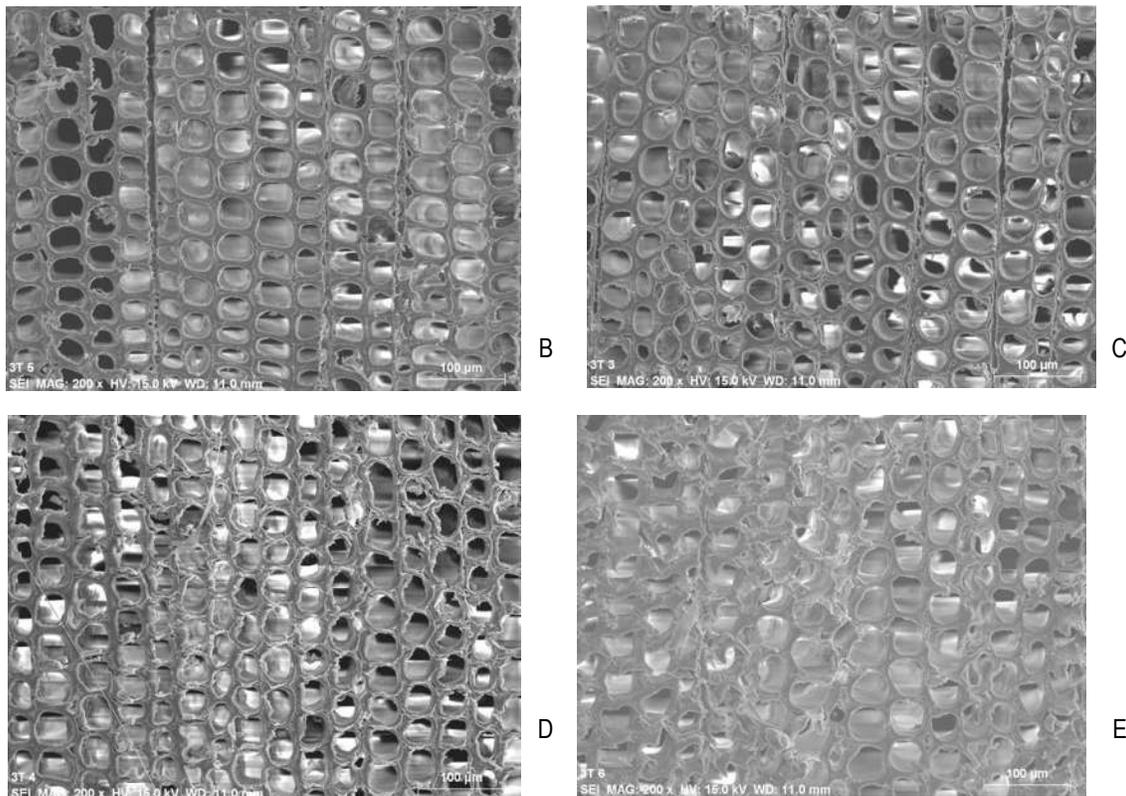


Figura 9. 162 (B, C, D y E) Muestra de madera sana corte transversal a 100 μm

La madera de la viga 1 en un corte transversal del área sometida a compresión de la viga 1 a un aumento de 2000 μm . presenta al igual que la muestra anterior el área total de la muestra. Y se procedió a tomar cuatro imágenes en cuatro puntos diferentes como se observa en la figura 9. 163.

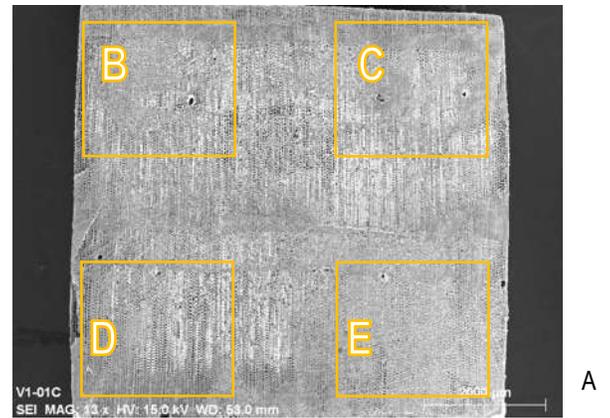


Figura 9. 163 (A) Muestra de la madera de la viga 1 corte transversal a 2000 μm

En la figura 9.164 Es posible ver los lúmenes de la muestra de la madera de la viga 1 en su corte transversal del área superior de la viga a 100 μm , en ellas es posible observar cómo han cambiado las condiciones en las que esta madera se encuentra. Su estructura presenta las características anatómicas normales de una madera de pino, pero su estructura está deteriorada debido a los esfuerzos mecánicos que esta viga sufrió durante su uso en el edificio.

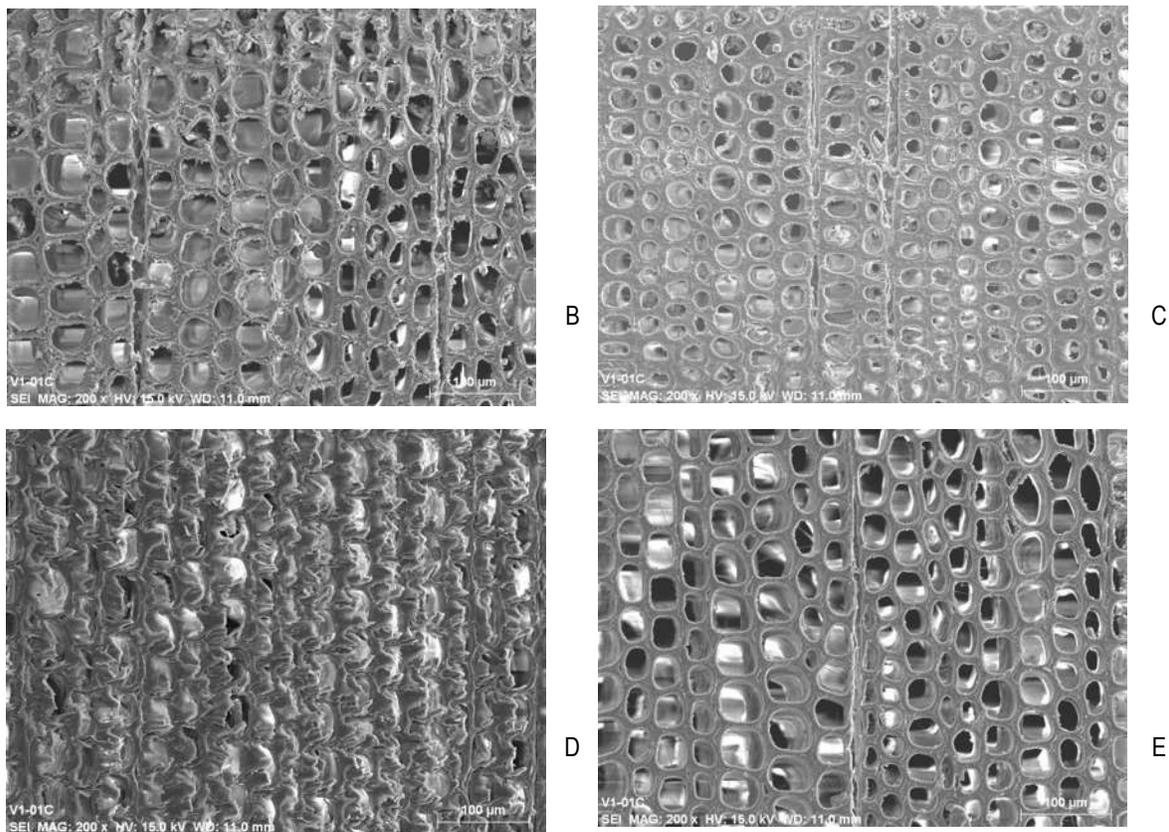


Figura 9. 164 (B, C, D y E) Muestra de la viga 1 parte superior sometida a tensión corte transversal a 100 μm .

La madera de la viga 1 en un corte transversal en el área de la viga sometida a esfuerzos de tensión a un aumento de 2000 μm . presenta el área total de la muestra. Siguiendo el mismo criterio que en las otras dos muestras, se procedió a tomar cuatro imágenes en cuatro puntos diferentes como se observa en la figura 9. 165

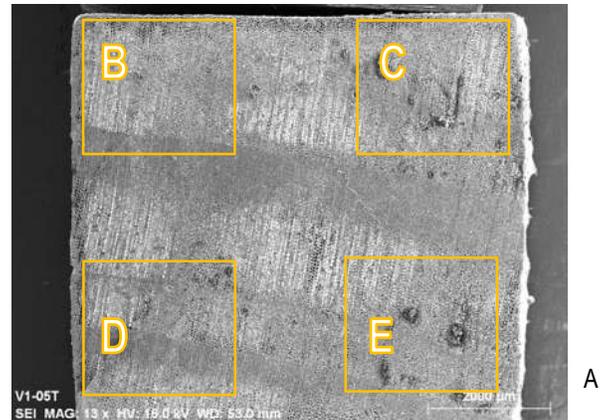


Figura 9. 165 (A) Muestra de la viga 1 área superior corte transversal a 2000 μm

En la figura 8.166 se observan los lúmenes de la muestra de la madera proveniente de la viga 1 en su corte transversal del área inferior de la viga a 100 μm , en ellas es posible observar cómo han cambiado las condiciones en las que esta madera se encuentra. Su estructura presenta las características anatómicas normales de una madera de pino, pero su estructura está deteriorada debido a los esfuerzos mecánicos que esta viga sufrió durante su uso en el edificio.

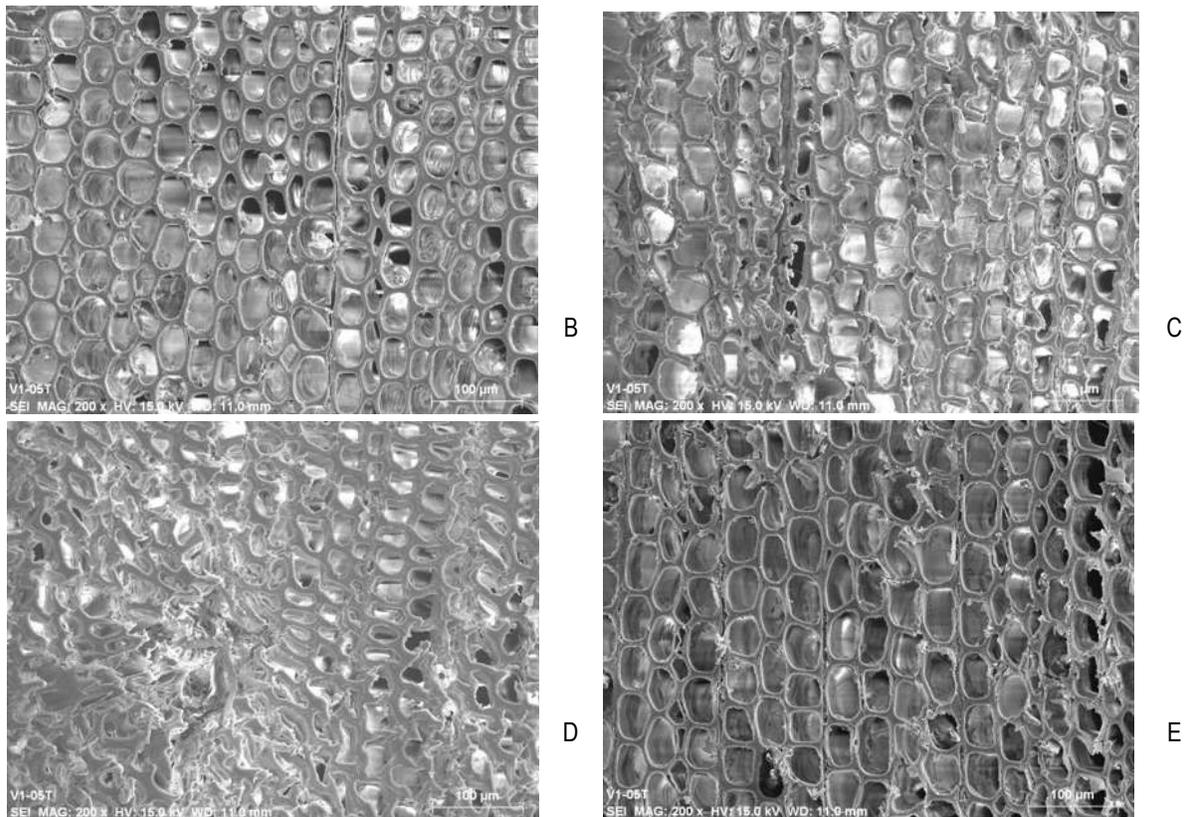


Figura 9. 166 (B, C, D y E) Muestra viga 1 parte inferior área sometida a tensión, corte transversal a 100 μm

La madera de la viga 2 en un corte transversal en el área de la viga sometida a esfuerzos de tensión a un aumento de 2000 μm . presenta el área total de la muestra. Siguiendo el mismo criterio antes mencionado se tomaron cuatro imágenes en cuatro puntos diferentes ver figura 9. 167.

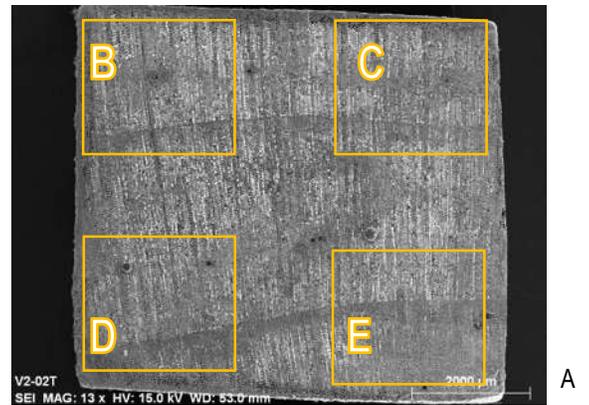


Figura 9. 167 (A) Muestra de la viga 2 área inferior corte transversal a 2000 μm .

En la figura 9.168 es posible ver los lúmenes ya más deteriorados de esta madera en la muestra de la viga 2 en su corte transversal del área inferior de la viga a 100 μm , en ellas es posible observar cómo han cambiado las condiciones de la madera. Su estructura presenta las características anatómicas normales de una madera de pino, pero su estructura está aún más deteriorada que la madera de viga 1 debido a los esfuerzos mecánicos que esta viga por su uso en el edificio, pero también presenta muestras de ataque biológico producido por hongos.

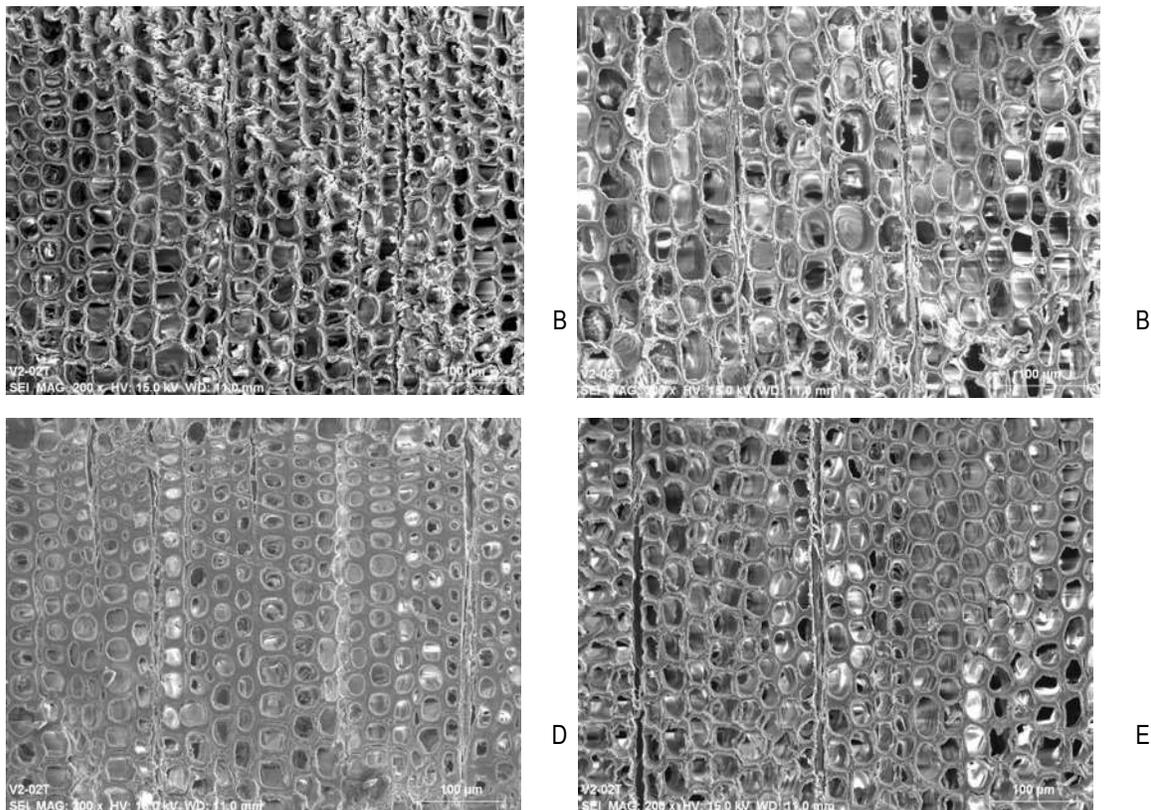


Figura 9. 168 (B, C, D y E) Muestra de la viga 2 área inferior sometida a tensión corte transversal a 100 μm

La madera de la muestra de la viga 2 proveniente del área superior en un corte transversal a un aumento de 2000 μm . presenta al igual que la muestra anterior el área total de la muestra. Tomaron cuatro imágenes en cuatro puntos diferentes como se observa en la figura 9. 169

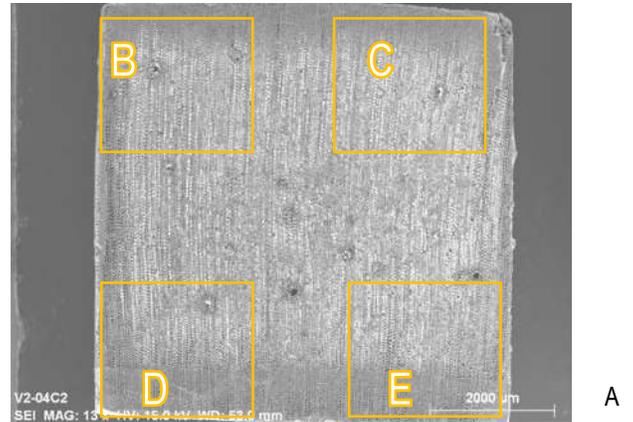


Figura 9. 169 (A) Muestra de la viga 2 área superior corte transversal a 2000 μm

La figura 9.170 presenta los lúmenes más deteriorados de la madera de la viga 2 en su corte transversal del área de compresión de la viga a 100 μm , en ellas es posible observar las condiciones de esta madera. Su estructura presenta aún más deteriorada que la madera de la viga 1 debido a los esfuerzos mecánicos y también presenta muestras de ataque biológico producido por hongos.

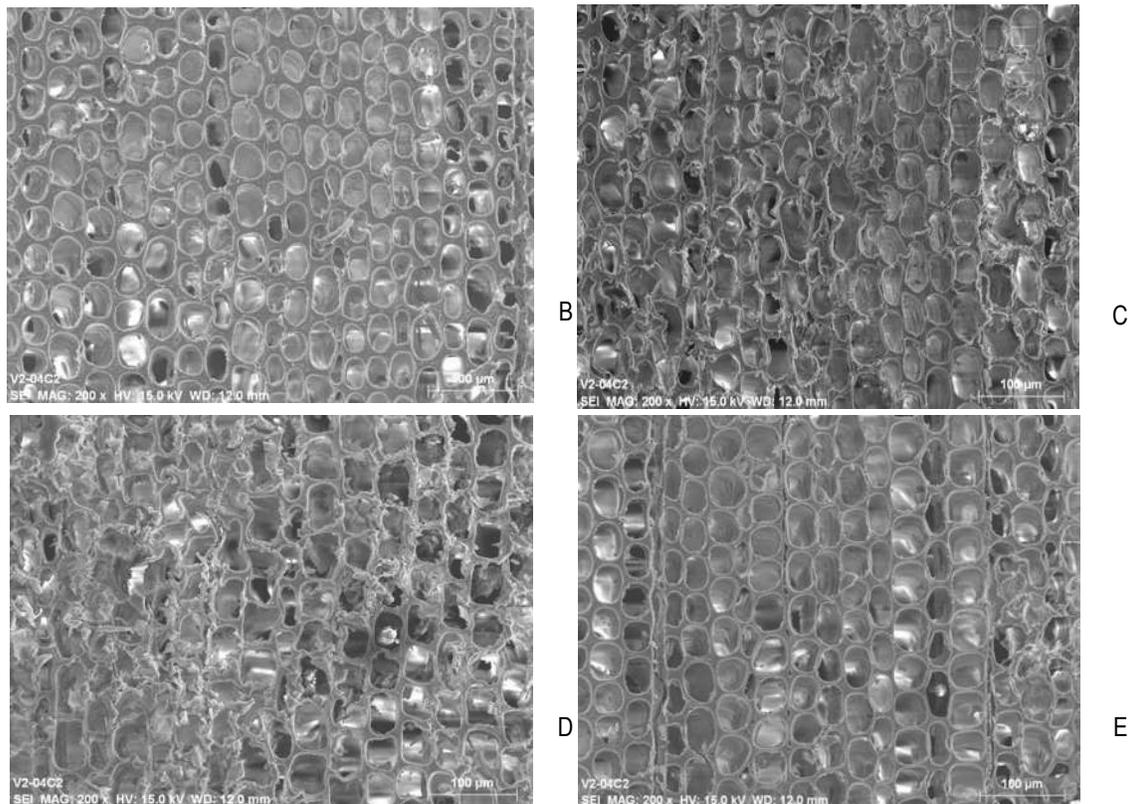


Figura 9. 170 (B, C, D y E) Muestra viga 2 área sometida a compresión, corte transversal a 100 μm

9.6.2. Determinación de los elementos estructurales de las muestras a nivel microscópico

En las imágenes de la madera sana se puede observar en el corte transversal; las distintas capas de las paredes de las células de traqueidas de madera temprana que (formadas durante la época favorable de crecimiento) están en buenas condiciones. Son delgadas y con lúmenes amplios; cumpliendo correctamente con su función de conducción, (ver figura 9.171 a).

Al observar las traqueidas en su corte radial podemos ver que cuentan con puntuaciones aeroladas uniseriadas (ver figura 9.171 b) y en su campo de cruzamiento (donde se unen las células de traqueidas con las células parenquimáticas radiales) puntuaciones fenestriiformes, (ver figura 9.171 c) características típicas de una madera de coníferas en óptimas condiciones. En tanto que en las imágenes de la madera deteriorada de las vigas 1 y 2 se puede observar en los cortes transversales de cada una de ellas, las capas de las paredes celulares de las traqueidas de la madera están dañadas.

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. La luz de los lúmenes se puede ver obstruida, no es posible tener una vista lineal de su interior su función de conducción no es buena es posible observar que ha sufrido una deformación. (ver Figuras 9.172 a y 9.172 a)

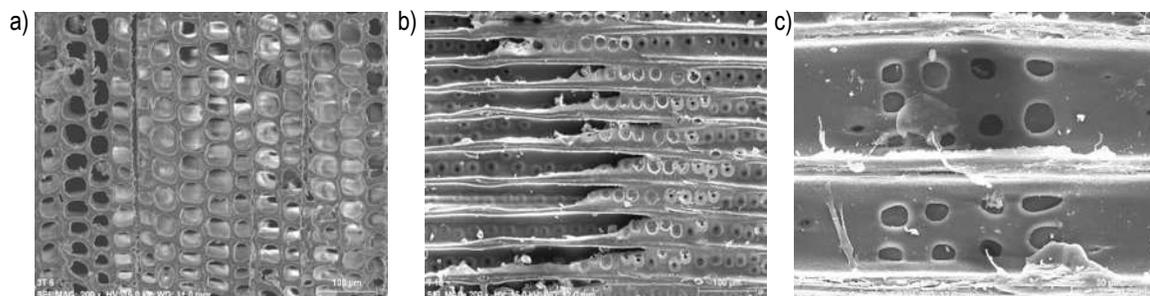


Figura 9. 171 Muestra de madera sana en corte transversal a 100µm. b) corte de madera sana vista radial, a 100µm. c) vista del campo de cruzamiento de la madera sana a 30 µm

Al observar las traqueidas en su corte radial podemos ver que la viga 1 cuentan con puntuaciones aeroladas uniseriadas y biseriadas, (ver Figura 9.172 b) en tanto que la viga 2 cuentan con puntuaciones aeroladas uniseriadas (ver Figura 9.173 b), pero también en la viga 1 vemos como la madera sufrió aberturas en el interior de sus paredes celulares debido a los esfuerzos de carga a los que fueron sometidas, (ver Figura 9.174 b).

En su campo de cruzamiento (done se unen las células de traqueidas con las células parenquimáticas radiales) ambas presentan puntuaciones fenestriiformes, (ver Figura 9.174 a).

En su corte tangencial podemos ver los rayos de tipo uniseriados que van de 1-13 en la viga 1 (ver Figura 9.172 c) y de 3-14 en la viga 2 (ver Figura 9.173 c) y canales resiníferos donde ya no es posible ver la pared leñosa ni las células epiteliales debido al deterioro, (ver Figura 9.174 c).

Todas las imágenes presentan residuos de polvo y señales de haber sido alimento de termitas, al igual que presencia de linfas de hongos, (ver Figura 9.174 b). (Barañaño, 2008)

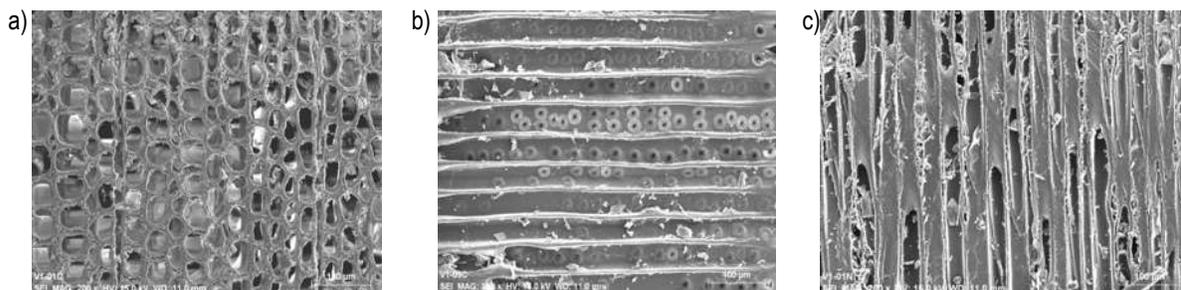


Figura 9. 172 Muestra de viga 1 parte sometida a tensión corte transversal a 100µm. b) corte radial de madera de la viga 1 vista con dos tipos de puntuaciones a 100µm. c) corte tangencial de la viga 2 a 100 µm

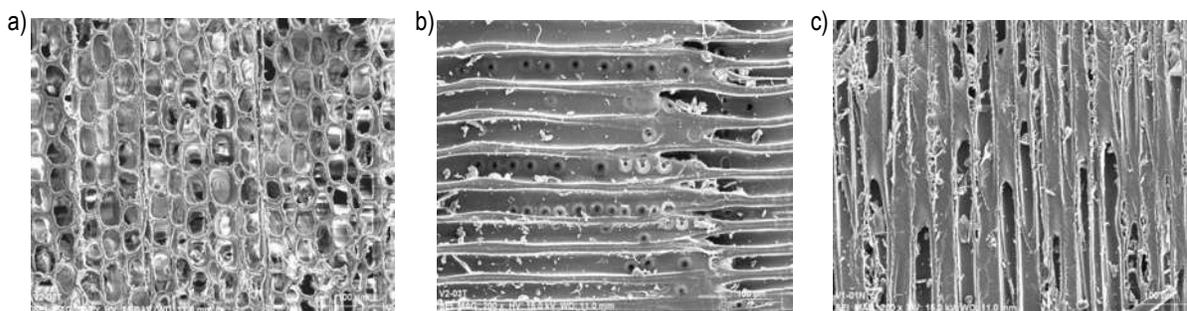


Figura 9. 173 Muestra viga 2 parte sometida a tensión corte transversal a 100µm. b) corte radial de madera de la viga 2 vista con puntuaciones uniseriadas a 100µm. c) corte tangencial de la viga 2 donde se ven los rayos a 100 µm

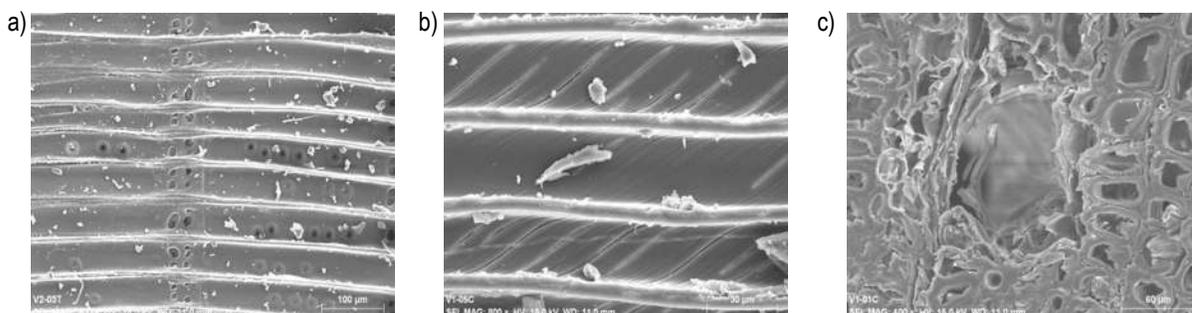


Figura 9. 174 Muestra viga 2 parte sometida a tensión corte transversal donde se observa el campo de cruzamiento a 100 µm. b) corte radial de madera de la viga 1 vista de la pared de traqueida fracturada, residuos de madera y una linfa de hongos a 30µm. c) corte transversal

9.6.3. Determinación de abundancia y tamaño de los elementos estructurales de las muestras a nivel microscópico

Al obtener la disociación de los elementos celulares de las muestras de la madera sana, de la madera de la viga 1 y la madera de la viga 2. Fue posible realizar mediciones de sus elementos. Las longitudes de las traqueidas fueron

medidas después de esta separación de elementos, debido a que en las muestras de microscopio no era posible determinar su longitud debido al tamaño de estas.

En los cubos y los cortes histológicos realizados para los microscopios electrónico de barrido y óptico, no era posible determinar la longitud puesto que no se observaban estas células de forma completa en ninguna de las otras muestras ya mencionadas anteriormente. Así que se procedió a realizar otras mediciones de estos elementos, obteniendo los resultados siguientes.

Después de efectuar las mediciones de los elementos disociados se observó que los diámetros de los lúmenes son mayores en la viga 1, siendo el menor el de la madera sana, pero entre este y la viga 2 se presentan valores de diámetros muy similares. Las paredes de las traqueidas son más gruesas en la viga 1 y que el material sano es el que presenta valores más bajos, pero casi son semejantes con la viga 2.

Los diámetros de las traqueidas son mayores en la viga 1, y el material sano es el más bajo, pero al igual que en los otros dos puntos este y la viga 2 se asemejan (ver figura 9.175).

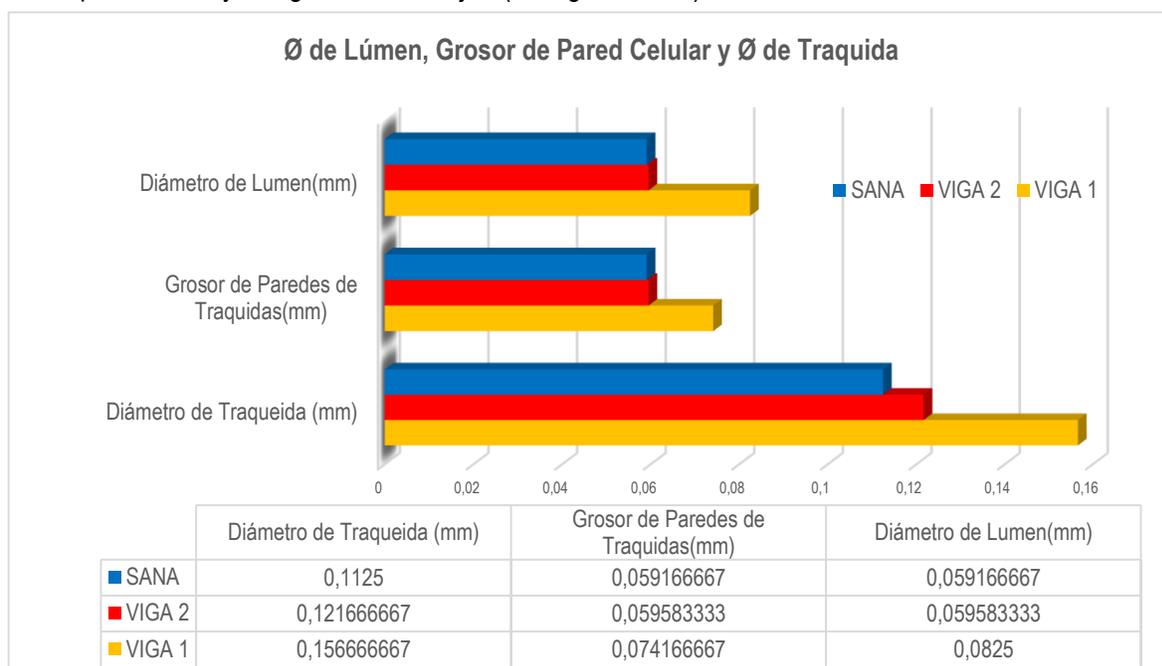


Figura 9. 175 Elementos en el material disociado.

La madera de la viga 2 presenta una mayor cantidad de lúmenes en las muestras de 8x8x8 mm utilizadas para el microscopio electrónico de barrido. La madera con menor cantidad de lúmenes es la madera sana. El porcentaje de lúmenes por muestra es mayor en la madera sana y el más bajo esta en la madera de la viga 1.

En cuanto al espesor de la pared celular el porcentaje más alto lo tiene la madera de la viga 1 y el más bajo lo presenta la madera sana, (ver figura 9.176).

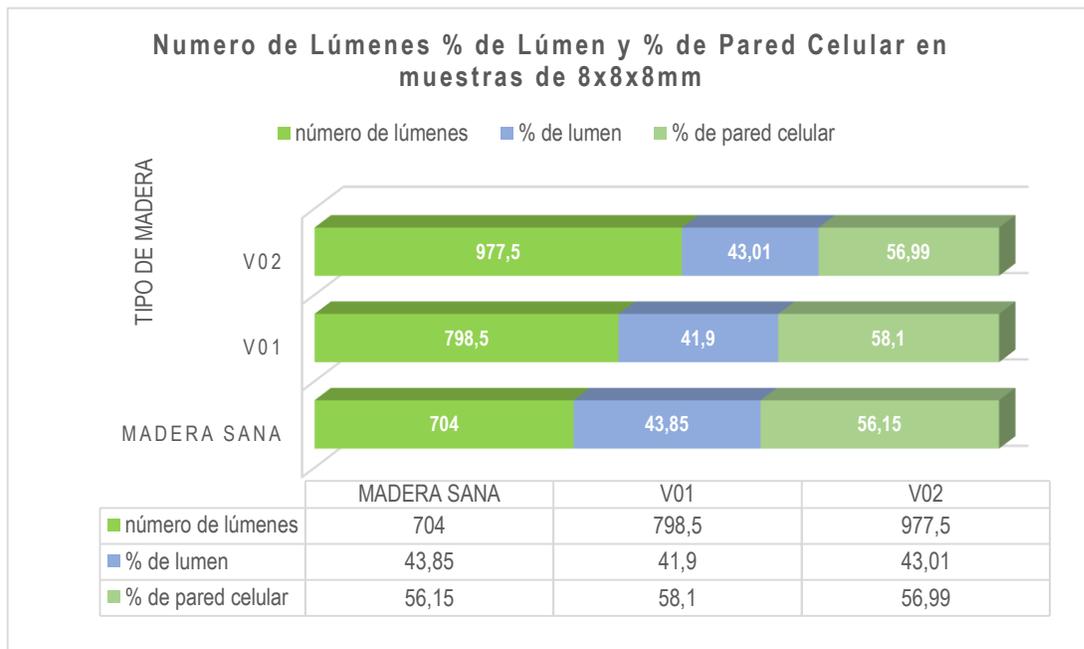


Figura 9. 176 Elementos en el material disociado en la muestra de 8x8x8 mm

Las muestras de 8x8x8 mm de la madera de la viga 2 presenta una mayor longitud de traqueidas que las otras muestras utilizadas, la menor longitud lo presenta la madera sana. La madera que presenta la mayor cantidad de capas de células en las muestras de 8x8x8 mm es la viga 1 y con menor cantidad de capas de células en la madera sana, (ver figura 9.177).

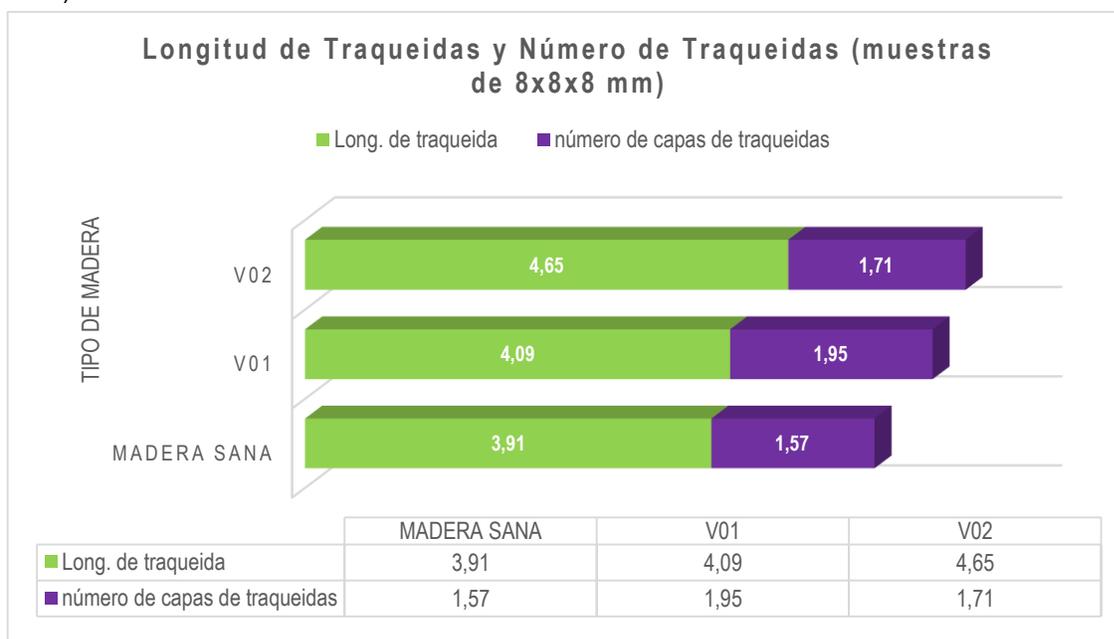


Figura 9. 177 Longitud de traqueidas en la muestra de 8x8x8 mm

La siguiente figura muestra la cantidad de traqueidas que abarca el área del transductor V130. La cantidad de células es mayor en la madera de la viga 2 y en la madera sana tenemos la menor cantidad (ver figura 9.178).

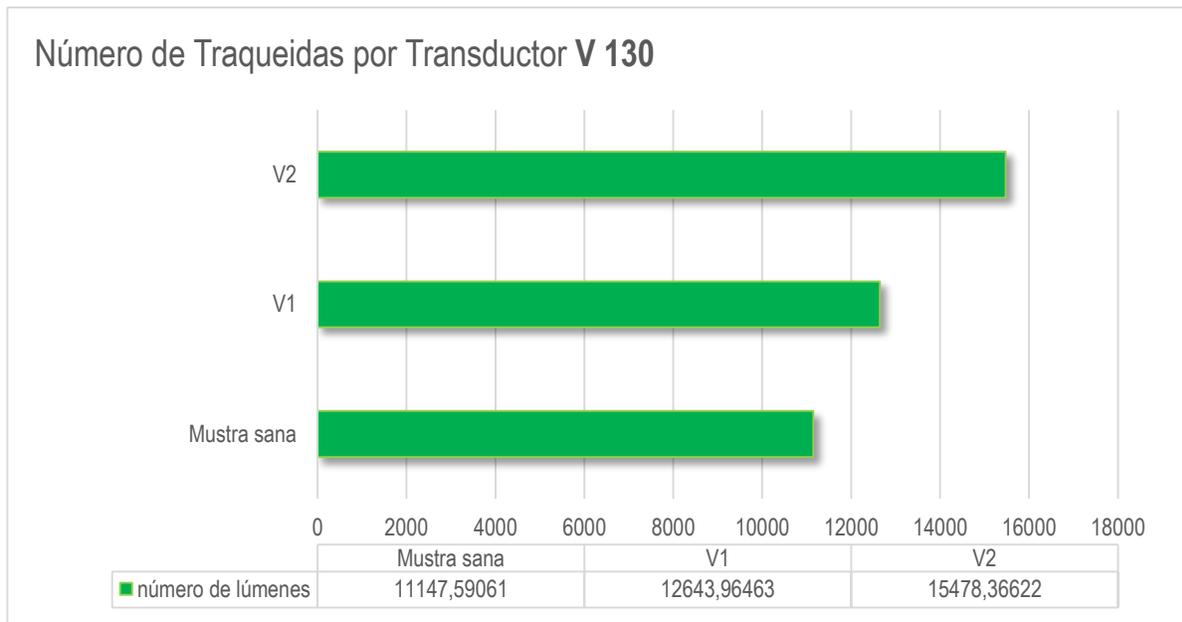


Figura 9. 178 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V 130

Una vez cuantificadas las cantidades de células por transductor se calculó la cantidad de traqueidas medidas utilizando el transductor V130 en las muestras empleadas para las mediciones ultrasónicas.

En las muestras de madera sana la cantidad de traqueidas que abarca el área del transductor V130, es la mayor y la menor es en la madera de la viga 1 (ver figura 9.179).

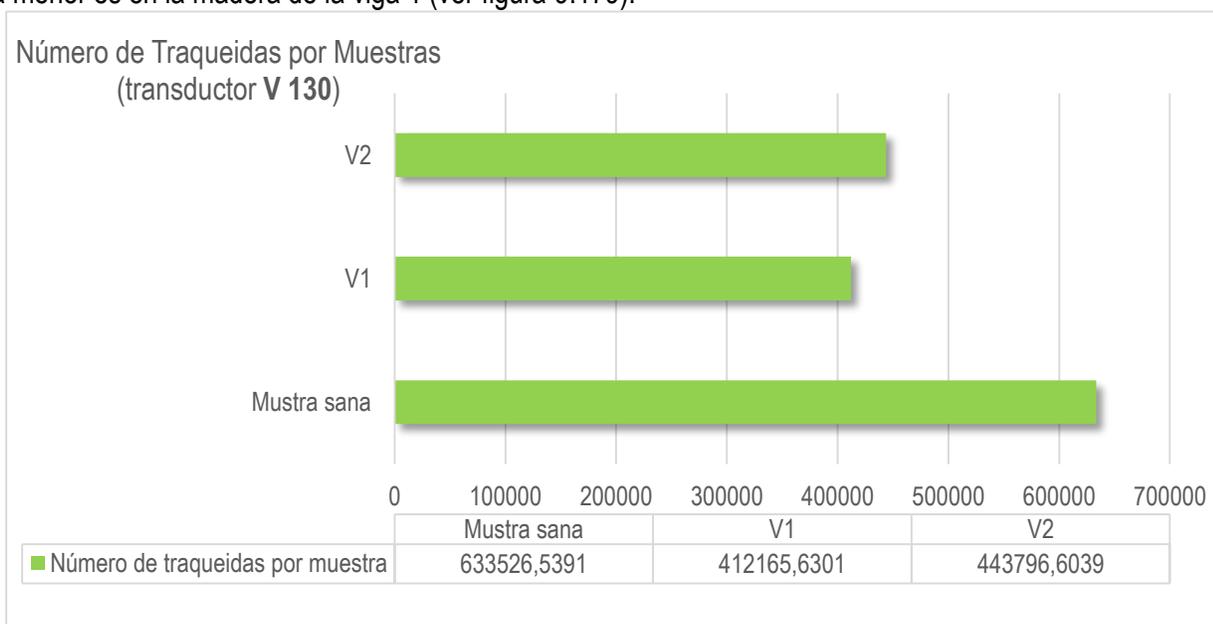


Figura 9. 179 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V130, en las muestras

La figura 9.180 muestra la cantidad de traqueidas que abarca el área del transductor V151. La cantidad de células es mayor en la madera de la viga 2 y en la madera sana tenemos la menor cantidad (ver figura 9.180).

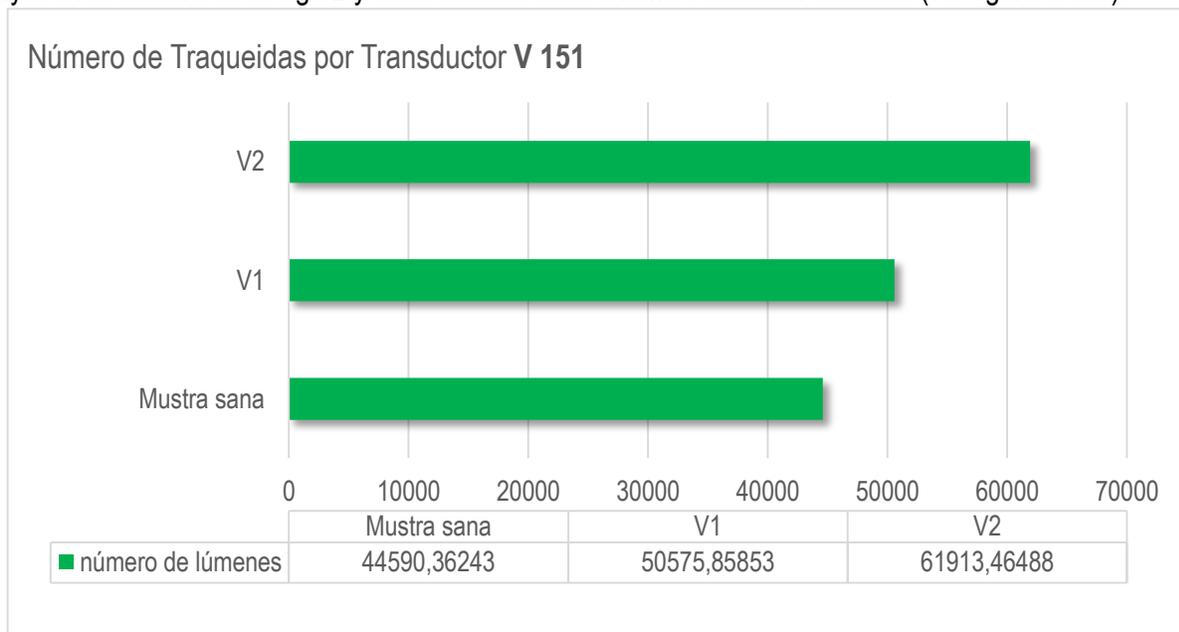


Figura 9. 180 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V 151

Al igual que con el transductor anterior se obtuvieron las cantidades de células y se calculó la cantidad de traqueidas medidas utilizando el transductor V151 en las muestras empleadas para las mediciones ultrasónicas. En las muestras de madera sana la cantidad de traqueidas que abarca el área del transductor V151, es menor y la mayor cantidad la presenta la madera de la viga 2 (ver figura 9.181).

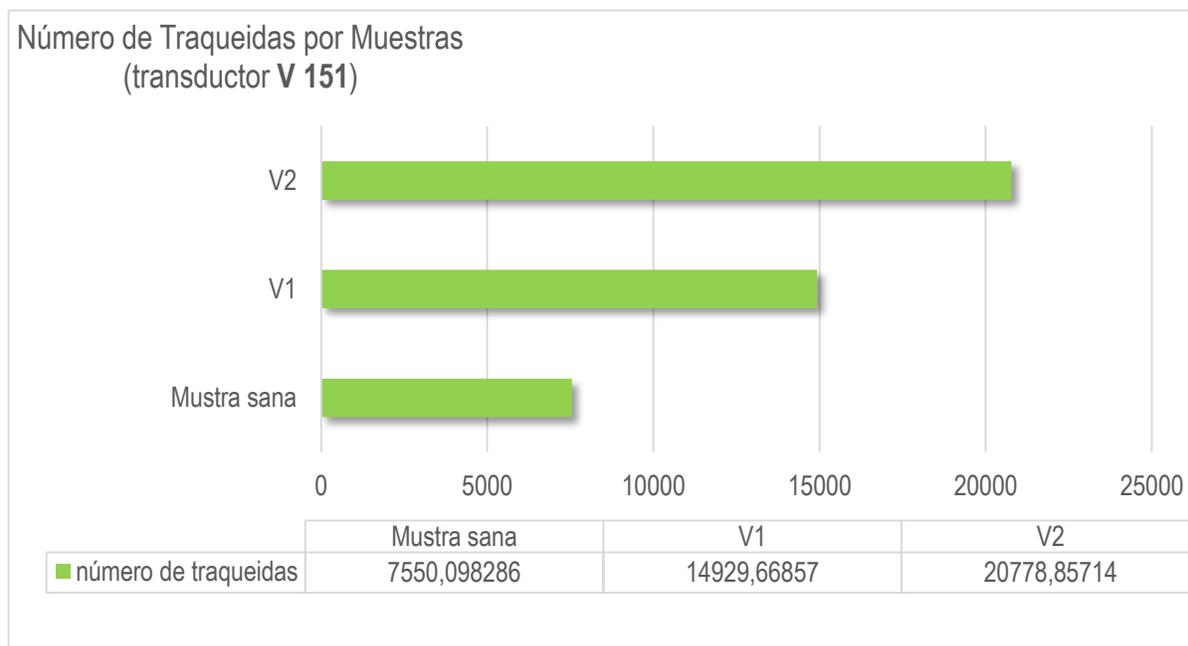


Figura 9. 181 Numero de traqueidas que es posible leer con el transductor V151, en las muestras

Respecto a el coeficiente de rigidez podemos ver que el material sano es el más rígido y el que presenta menores valores, es el de la viga 2, (ver figura 9.182).

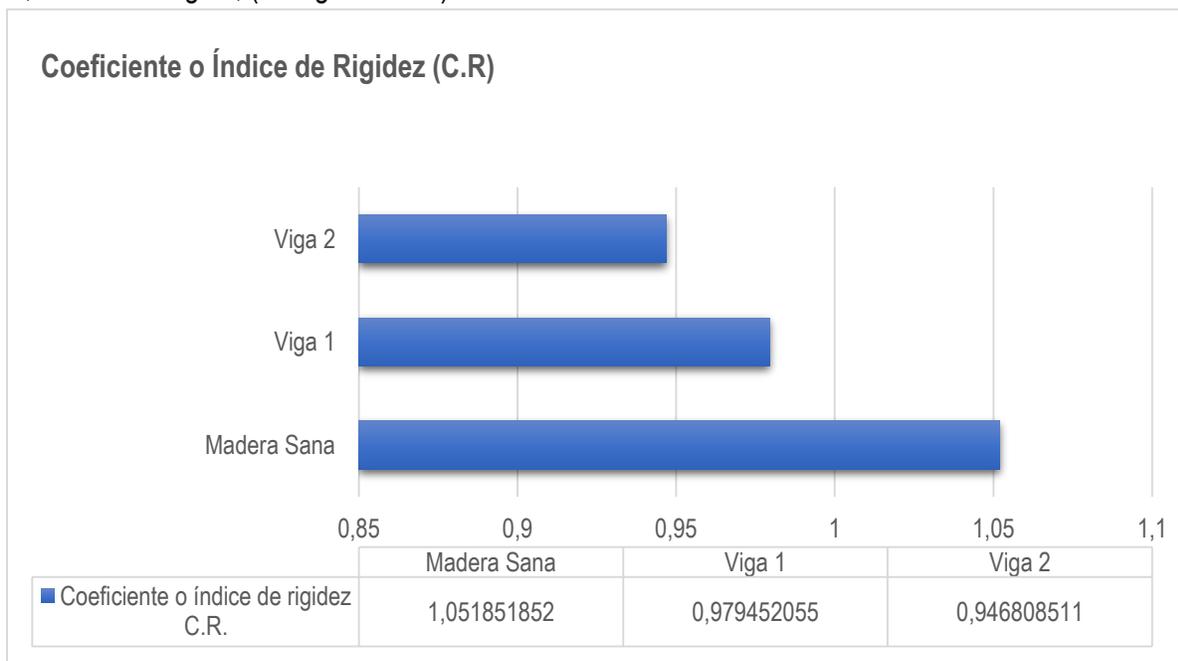


Figura 9. 182 Coeficiente de rigidez en los tres materiales

En cuanto al coeficiente de flexibilidad se aprecia que la viga 2 es ligeramente más flexible que el material sano y es visible que la viga 1 es el material con menor flexibilidad, (ver figura 9.183)

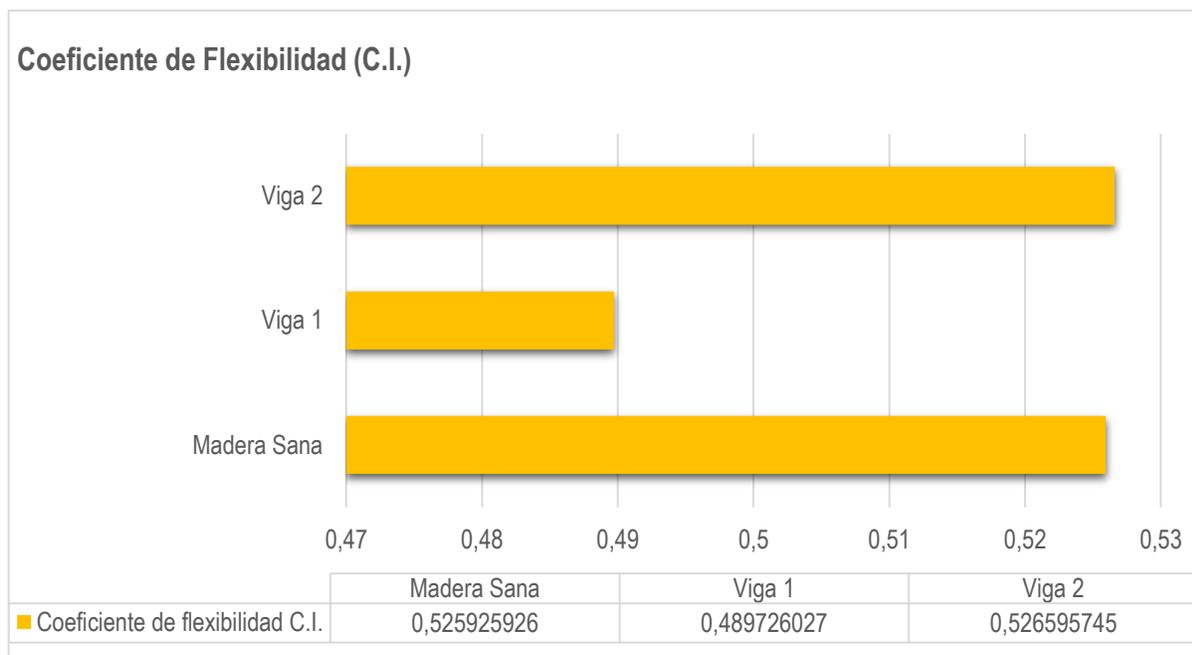


Figura 9. 183 Coeficiente de flexibilidad en los tres materiales

Respecto a el coeficiente de Peteri o índice de esbeltez podemos ver que el material sano es el más delgado y el que presenta menores valores, es el de la viga 2, (ver figura 9.184).

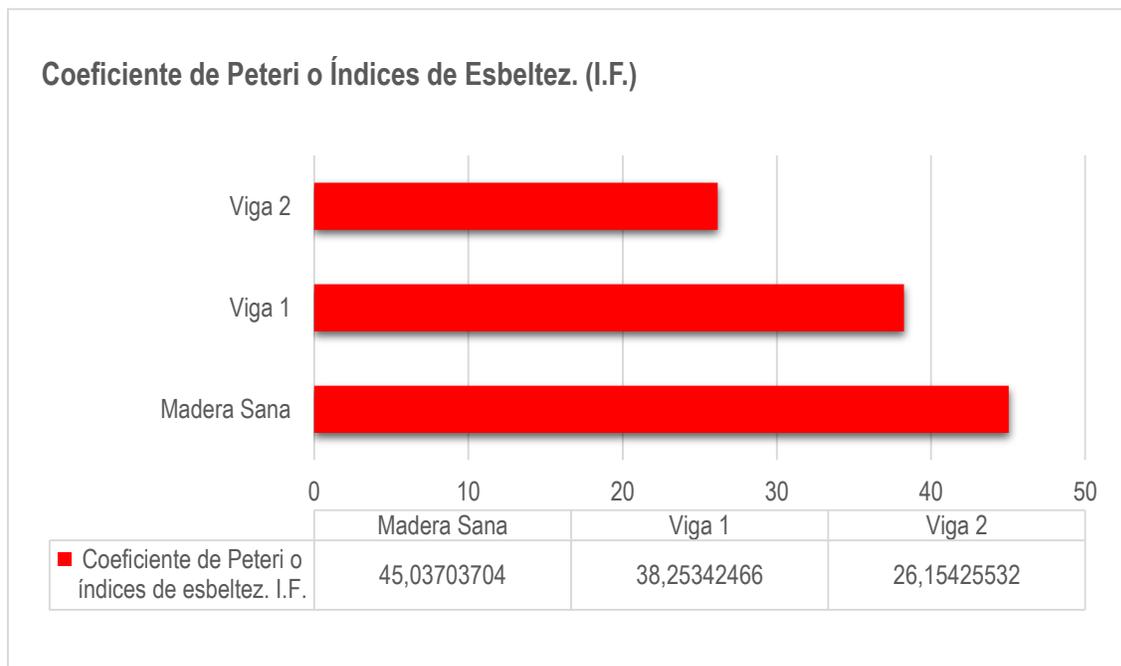


Figura 9. 184 Coeficiente de Peteri en los tres materiales

La relación de Runkel muestra que el material sano y la viga 1 son los que presenta los valores más altos, ambos con el mismo rango de 2 y el que presenta el menor valor es la viga 2, (ver figura 9.185).

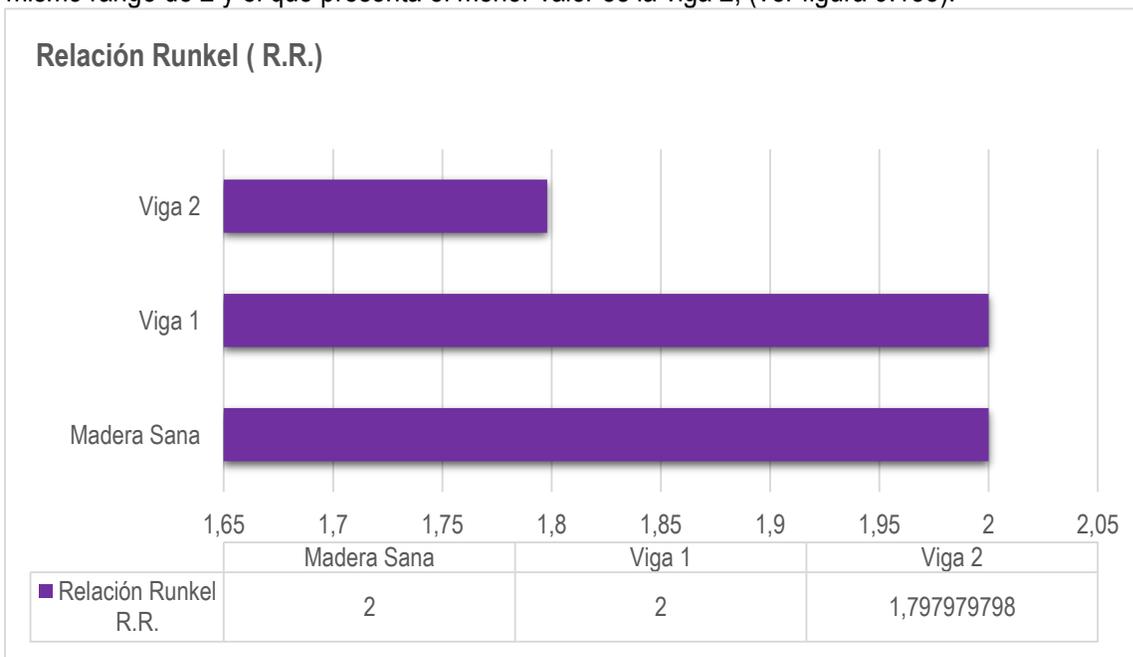


Figura 9. 185 Relación de Runkel en los tres materiales

10 Discusión

Se determinó por medio ultrasónicos tanto la Velocidad Longitudinal, la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el módulo de corte y la Atenuación Ultrasónica para los dos tipos de velocidades, en las diferentes direcciones de las muestras de madera sana, de la madera de la viga 1 y de la madera de la viga 2. Siendo los valores medidos por la técnica de emisión-transmisión.

Los resultados de este trabajo confirman que el valor de la velocidad fue más alta en la madera sana y más baja en la madera de la viga 2, la cual es la más deteriorada, coincidiendo con McGovern (2011), que nos presenta en su trabajo qué; “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”.

Esto afecta directamente a la densidad del material y provoca cambios en su estructura interna; cambios que afectan a la propagación de las ondas ultrasónicas. Este fenómeno también lo observo McGovern (2011) y menciona lo siguiente: “Se observó que la velocidad aumenta con el aumento de la frecuencia y disminuye con el aumento de la cantidad de deterioro, mientras que la atenuación aumenta con el aumento de la frecuencia y la descomposición”.

Debido a la naturaleza multicapa de las muestras de madera, la velocidad promedio de las muestras de madera es la velocidad de la energía del modo más rápido. En los bloques de la madera sana, la velocidad Longitudinal promedio de las tres caras de las muestras en los tres sentidos de la madera, fue de aproximadamente 2975.77 m/s a 1 MHz; mientras que para los bloques de la madera de la viga 1 el promedio fue de 2537.37 m/s a 1 MHz y en la viga 2, 2311.37 m/s a 1 MHz (ver figura 10.1).

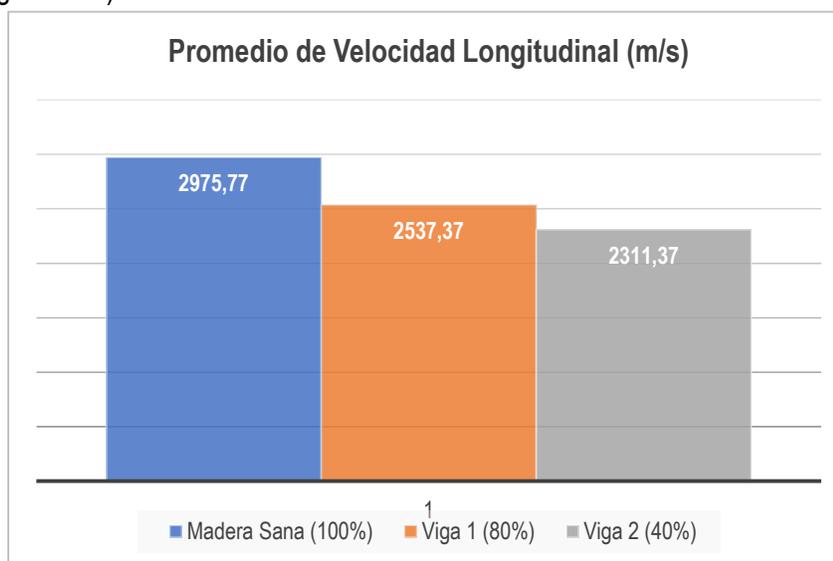


Figura 10. 1 Grafica de los promedios de la Velocidad Longitudinal, de las tres caras de las muestras en sus tres sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2.

En los bloques de la madera sana para el caso de la velocidad Transversal o de Corte el promedio de los tres sentidos de la madera, en las tres caras de las muestras en los seis sentidos de la madera, nos dan los promedios de 2044.02 m/s a 0.5 MHz; mientras que para los bloques de la madera de la viga 1 el promedio fue de 1574.50 m/s a 0.5 MHz y en la viga 2, 1437.98 m/s a 0.5 MHz. (ver figura 10.2).

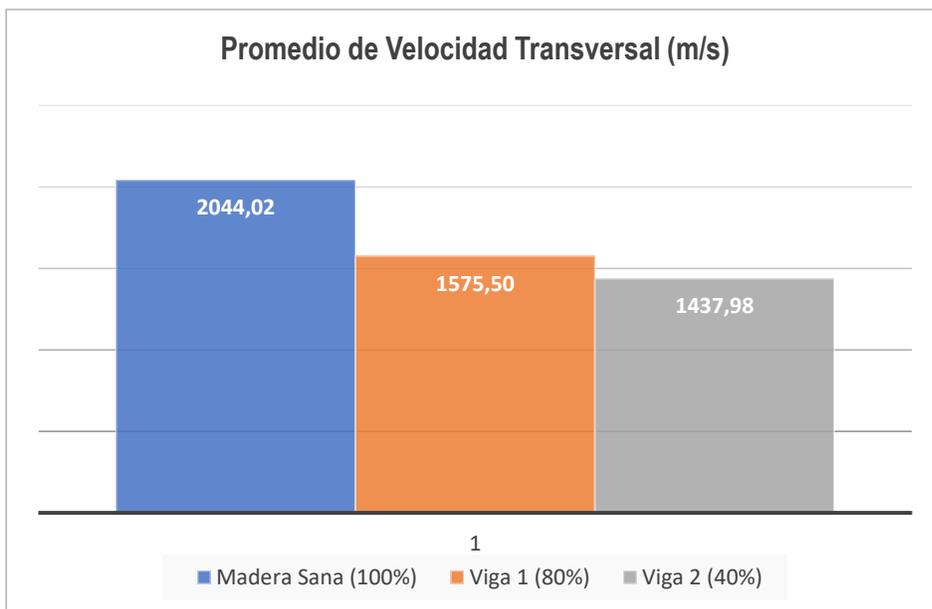


Figura 10. 2 Grafica de los promedios de la Velocidad Transversal, de las tres caras de las muestras en sus seis sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2

Se observó que las mediciones de la velocidad longitudinal y transversal son sensibles a la dirección de propagación de la onda ultrasónica ya que la interacción entre el haz ultrasónico y la anatomía de la madera presenta una desviación y perdida de dicho parámetro ultrasónico durante el paso de este en el medio analizado. Los valores más altos de velocidad siempre se presentaron en la madera sana y los más bajos en la viga 2.

Así vemos que la orientación en la que se realice la medición afecta a su resistencia, esto provocado por la estructura propia del material. McGovern (2011) 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.

Al efectuar una comparación entre las velocidades y el número de anillos pudimos observar que este sí afecta en las mediciones. (ver figura 9.185)

McGovern (2011) nos habla en su trabajo citando a (Anon., s.f.) que en sus cubos de madera que tienen una estructura multicapa 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.

También en este mismo artículo el autor cita también a (Rose, 1999) y (Pavlakovic, 2001), ellos expresan que debido a la naturaleza multicapa de las muestras de madera, el pulso ultrasónico puede no mantener en su forma original debido a la dispersión.

En los bloques de la madera sana, empleando la velocidad Longitudinal el promedio del Módulo de Young para las tres caras de las muestras en los tres sentidos de la madera, fue de $51.43 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 1 MHz; para los bloques de la madera de la viga 1 el promedio fue de $40.38 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 1 MHz y en la viga 2 el valor obtenido fue de $25.99 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 1 MHz. (ver figura 10.3).

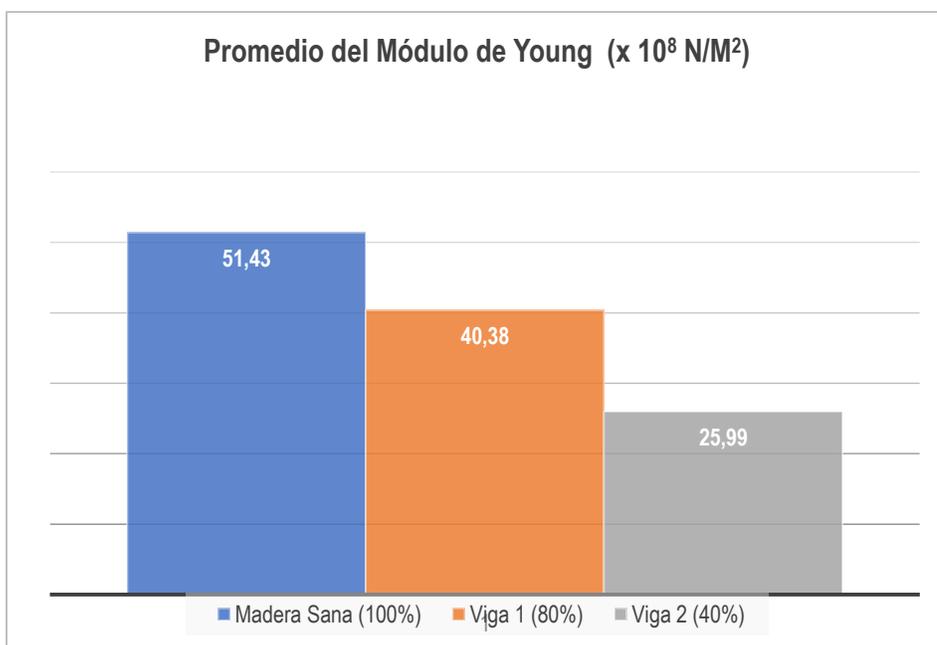


Figura 10. 3 Grafica de los promedios del Módulo de Young empleando la Velocidad Longitudinal, en las tres caras en sus tres sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga 2

En los bloques de la madera sana para el caso del Módulo de Corte utilizando la velocidad Transversal o de Corte, el promedio de los tres sentidos de la madera, en las tres caras de las muestras en los seis sentidos de la madera, nos dan los promedios de $20.83 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 0.5 MHz; mientras que para los bloques de la madera de la viga 1 el promedio fue de $10.08 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 0.5 MHz y en la viga 2 el valor fue de $7.73 \times 10^8 \text{ N/M}^2$ a 0.5 MHz. (ver figura 10.4).

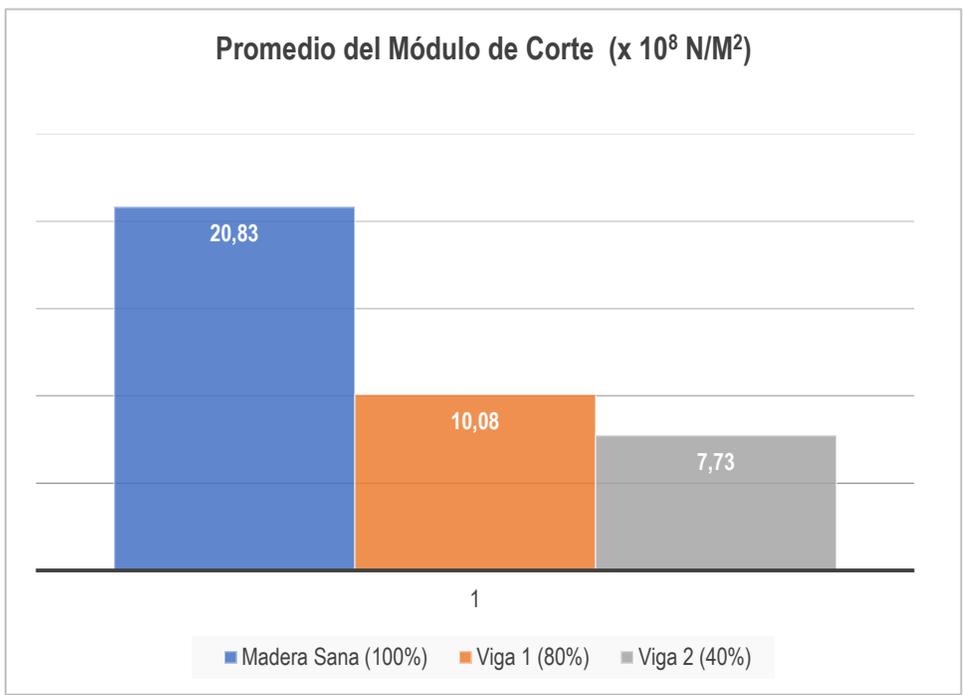


Figura 10. 4 Grafica de los promedios del Módulo de Corte empleando la Velocidad Transversal, en las tres caras en sus seis sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga2

Las magnitudes del coeficiente de atenuación en las tres caras de las muestras en los tres sentidos de la madera variaron en relación con las muestras de la viga 1 y la viga 2, utilizando la Velocidad Longitudinal, en la madera sana el promedio es de 0.29 (dB/mm) a 1 MHz; mientras que para la madera de la viga 1 (80% de desintegración) el valor promedio es de 0.62 (dB/mm) a 1 MHz y el valor promedio para la viga 2 (40% de desintegración) es de 0.83 (dB/mm) a 1 MHz. (ver figura 10.5).

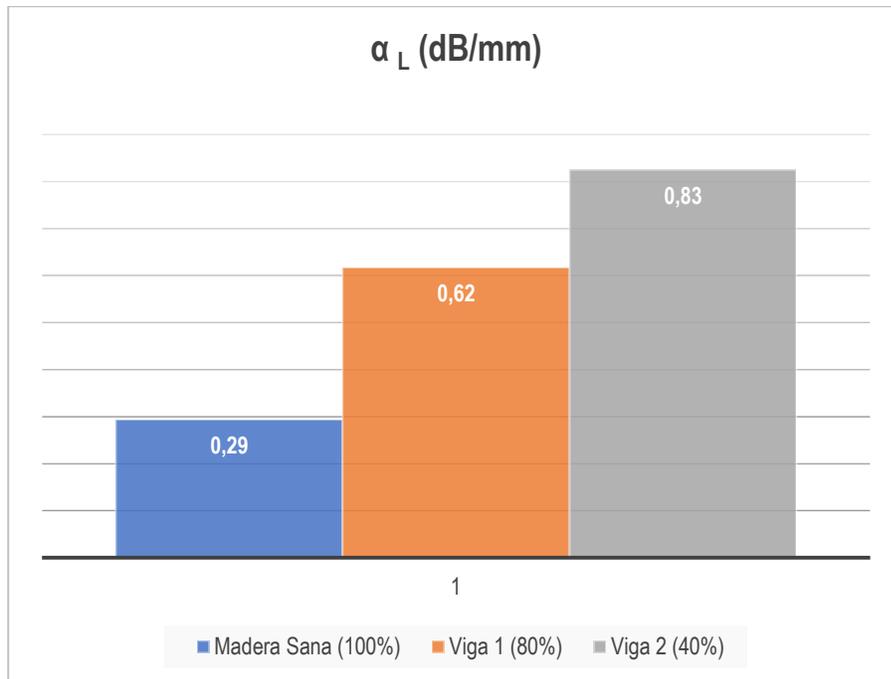


Figura 10. 5 Grafica de los promedios de la Atenuación Ultrasónica empleando la Velocidad Longitudinal, en las tres caras en sus tres sentidos de las muestras para la madera sana, la viga 1 y la viga 2

El coeficiente de atenuación utilizando la velocidad Transversal o de Corte, en los seis sentidos de la madera, en las tres caras de las muestras; se observa que el promedio para la madera sana es de 0.28 (dB/mm) a 0.5 MHz, en la viga 1 es de 0.58 (dB/mm) a 0.5 MHz y para la viga 2 el valor promedio es de 0.70 (dB/mm) a 0.5 MHz. (ver figura 10.6).

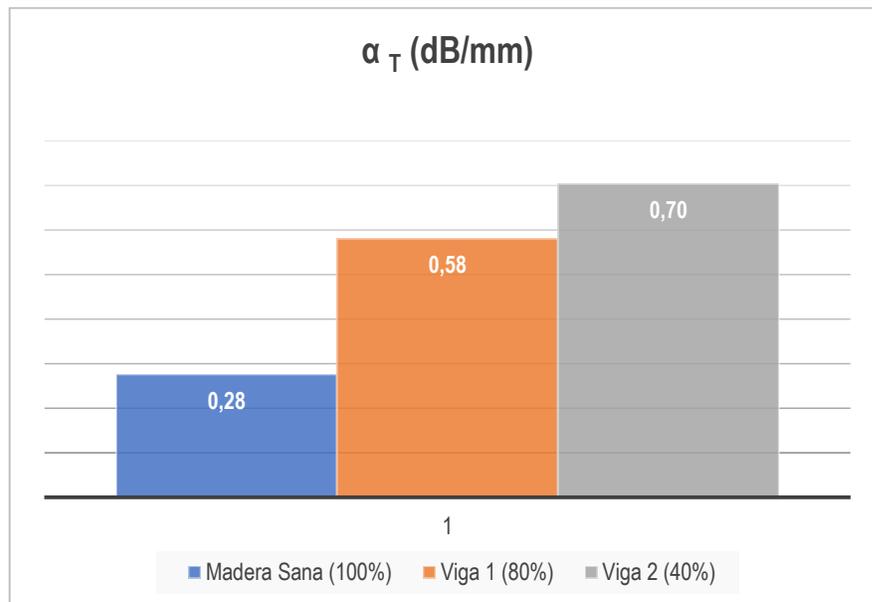


Figura 10. 6 Grafica de los promedios de la Atenuación Ultrasónica empleando la Velocidad Transversal, en las tres caras de las muestras en sus seis sentidos para la madera sana, la viga 1 y la viga 2

En los dos tipos de velocidades vemos que esta relación da valores es más alto en el eje longitudinal y más bajo en el eje radial. Que los valores de la Atenuación Ultrasónica (perdida de la energía) debido a la dispersión causada por la estructura de cada uno de los tres materiales, es más bajo en la madera sana y más alto en la viga 2. Por lo tanto, un estudio anatómico a nivel microscópico de la madera resulto una parte importante y complementaria para comprender como afecta está en las mediciones. Las imágenes de las estructuras microscópicas de las tres muestras de maderas (sana, viga 1 y viga 2), nos permitió observar como cambiaran las condiciones de deterioro entre ellas debido a los esfuerzos mecánicos a los que fueron sometidas las vigas y el grado de afectación provocado también por los hongos e insectos.

“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”. (McGovern, 2011)

Las características anatómicas de la madera representan un factor importante a considerar en ese estudio. La técnica de ultrasonido es capaz de registrar las pequeñas anomalías de los materiales. Pero también el realizar estudios anatómicos de las maderas, resulto interesante en esta investigación, encontrando que:

La madera de la viga 1 está conformada por células más grandes y gruesas que los otros dos materiales de la madera sana y la viga 2 siendo más rígido. La viga 2 es un material más flexible debido a sus características celulares, los tres presentan células de traqueidas alargadas como todas las coníferas. Pero el material sano presenta todas sus estructuras internas en óptimas condiciones, a diferencia de la viga 1 y la viga 2 las cuales están ya dañadas por agentes biológicos y por los esfuerzos de cargas a los que fueron sometidas durante su tiempo en uso. El número de lúmenes es mayor en la madera de la viga 2 y menor en la madera sana, pero en porcentajes encontramos que la madera sana cuenta con un número mayor; la que presenta un porcentaje menor es la viga 1. El análisis de estas imágenes nos permitió observar los grados de deterioro de estas vigas y entender otros fenómenos ocurridos durante la aplicación de la técnica de emisión transmisión de ultrasonido la cual permitió caracterizar sus propiedades elásticas.

Estas técnicas son pruebas destructivas, pero de poco impacto si se contempla que en los elementos estructurales de madera la cantidad de material requerido para su elaboración es mínima, pero que gracias a su implementación en este estudio, permitieron conocer las características y condiciones físicas en las que se encontraron los tres tipos de maderas para este estudio.

Apoyándonos en el microscopio electrónico de barrido y en la elaboración del material disociado de las tres muestras de maderas, fue posible comprobar después de medir y cuantificar cada uno de los elementos anatómicos de las muestras: que los resultados obtenidos con las mediciones anatómicas y del material disociado coinciden con los resultados del método de ultra sonido de emisión transmisión, en donde se observó que la madera sana presento valores más altos de la Velocidad Longitudinal, de la Velocidad Transversal, del Módulo de Young, del Módulo de Corte y el valor más bajo en la Atenuación Ultrasónica, en tanto que la viga 2 presento los valores más bajos en la Velocidad Longitudinal, en la Velocidad Transversal, en Módulo de Young, en Módulo de Corte y el valor más alto en la Atenuación Ultrasónica .

11 Conclusiones

La técnica de ultrasonido de emisión transmisión tiene una sensibilidad con la cual es posible calcular la Velocidad Longitudinal, la Velocidad Transversal, el Módulo de Young, el Módulo de Corte y el valor de la Atenuación Ultrasónica y el Umbral de Detección de la técnica (usando la velocidad longitudinal y la velocidad transversal).

Onda Longitudinal comparando los tres tipos de muestras y las tres variables analizadas en los sentidos LL, RR y TT.

- Las velocidades más altas se presentaron para los tres tipos de muestras en el sentido longitudinal (LL) y los valores más bajos en el sentido transversal (TT).
- En relación con el Módulo de Young se pudo observar que los valores más altos se encontraron para las tres muestras en el sentido longitudinal (LL) y los más bajos en el sentido transversal (TT).
- La atenuación ultrasónica se presentó con valores más altos en el sentido radial (RR) y los más bajos en el sentido longitudinal (LL), (ver tablas del apartado de resultados).

Onda Transversal comparando los tres tipos de muestras y las tres variables analizadas en los sentidos LR, LT, RL, RT, TL y TR.

- La velocidad transversal para los tres tipos de muestras de madera indica, que este tipo de onda es mayor en el sentido transversal de las muestras sanas (TL y TR). En el sentido longitudinal transversal (LT) para los tres tipos de muestras observamos que los valores son más parecidos, pero menores a los registrados en el sentido transversal de las muestras sanas. Los valores más bajos los presento el sentido radial tangencial (RT).
- El Módulo de Corte para la Onda transversal en el sentido transversal de las muestras sanas (TL y TR), es el que presenta los valores mayores. El sentido longitudinal transversal (LT) para los tres tipos de muestras observamos que los valores son más parecidos, pero menores a los registrados en el sentido transversal de las muestras sanas. Los valores más bajos los presento el sentido radial longitudinal (RL).
- En la atenuación para la onda transversal en el sentido radial de las muestras de la viga 2 (RL y RT), se presentan los valores mayores. El sentido longitudinal transversal y transversal longitudinal (LT y TL) para las muestras sanas observamos que los valores son los más bajos, pero menores a los registrados de las muestras de las vigas 1 y 2.

Comparación entre la Onda Longitudinal y la Onda Transversal para cada uno de los tipos de muestras en los sentidos LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR.

Velocidad Longitudinal y Velocidad Transversal para cada uno de los tipos de muestras en los sentidos LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR.

- La madera sana en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera presento el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial (LR).
- La madera de la Viga 1 en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radia (LR).
- La madera de la viga 2 en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera es el valor más alto como ocurre en los dos casos anteriores y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido radial transversal (RT).

Módulo de Young y Módulo de Corte para cada uno de los tipos de muestras en los sentidos LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR.

- La madera sana en el módulo Young, con la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial (LR).
- La viga 1 el módulo de Young en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo para el módulo de Corte lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido Tangencial radial (TR).
- La viga 2 el módulo de Young en la velocidad de onda longitudinal de medición, en el sentido longitudinal (LL) de la madera es el valor más alto y encontramos que el valor más bajo para el módulo de Corte lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido Radial Tangencial (RT).

Atenuación Ultrasónica para los dos tipos de Onda Longitudinal y la Onda Transversal para cada uno de los tipos de muestras en los sentidos LL, LR, LT, RR, RL, RT, TT, TL y TR.

- La madera sana presento en la Atenuación medida con la velocidad de onda transversal, en el sentido radial tangencial (RT) de la madera el valor más alto y encontramos que el valor más bajo en la Atenuación lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal radial (LR).

- La viga 1, presento en la Atenuación medida con la velocidad de onda longitudinal, en el sentido Radial (RR) de la madera el valor más alto y encontramos que el valor más bajo lo presenta la velocidad de onda transversal en el sentido longitudinal transversal (LT).
- La viga 2, presento en la Atenuación medida con la velocidad de onda longitudinal, en el sentido radial (RR) de la madera el valor más alto y encontramos que el valor más bajo de la Atenuación lo presenta la velocidad de onda longitudinal en el sentido longitudinal (LL).

Características anatómicas de los tres tipos de madera.

Las pruebas anatómicas ayudaron a comprender mejor los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con la técnica de emisión transmisión de ultrasonido en las cuales siempre se observó que la madera sana siempre presento los valores más altos en las mediciones de velocidad, módulo de Young y módulo de corte y los más bajos en la atenuación. La viga 2 siempre presento los valores más bajos en las mediciones de velocidad, módulo de Young y módulo de corte y los más altos en la atenuación. La viga 1 siempre se mantuvo con los valores intermedios mediciones de velocidad, módulo de Young, módulo de corte y de atenuación.

El análisis de estas imágenes nos permitió observar los grados de deterioro de estas vigas y entender otros fenómenos ocurridos durante la aplicación de la técnica de emisión transmisión de ultrasonido la cual permitió caracterizar sus propiedades elásticas. La anatomía nos arrojó las siguientes características:

- Los lúmenes de la muestra de la madera sana en su corte transversal presento en su estructura las características anatómicas normales de una madera de pino en óptimas condiciones.
- Los lúmenes de la muestra de la madera de la viga 1 en su corte transversal se observó cómo su estructura anatómica presenta las características normales de una madera de pino, pero su estructura está deteriorada debido a los esfuerzos mecánicos que esta viga sufrió durante su uso en el edificio.
- Los lúmenes más deteriorados los presento la madera de la muestra de la viga 2 en su corte transversal, que su estructura presenta las características anatómicas normales de una madera de pino, pero está aún más deteriorada que la madera de viga 1 debido a los esfuerzos mecánicos por su uso en el edificio, pero también presenta muestras de ataque biológico producido por hongos.
- Los diámetros de los lúmenes son mayores en la viga 1, siendo el menor el de la madera sana, pero entre este y la viga 2 se presentan valores de diámetros muy similares.
- Las paredes de las traqueidas son más gruesas en la viga 1 y que el material sano es el que presenta valores más bajos, pero casi son semejantes con la viga 2.
- Los diámetros de las traqueidas son mayores en la viga 1 y en el material sano es el más bajo, pero al igual que en los otros dos puntos este y la viga 2 se asemejan.

- La madera de la viga 2 presenta una mayor cantidad de lúmenes en las muestras de 8x8x8 mm utilizadas para el microscopio electrónico de barrido. La madera con menor cantidad de lúmenes es la madera sana.
- El porcentaje de lúmenes por muestra es mayor en la madera sana y el más bajo esta en la madera de la viga 1.
- El espesor de la pared celular el porcentaje más alto lo tiene la madera de la viga 1 y el más bajo lo presenta la madera sana.
- La madera al presentar cambios en su estructura anatómica en madera tardía y madera temprana

Factores anatómicos que intervienen en la medición ultrasónica.

Al efectuar una comparación entre las velocidades y el número de anillos pudimos observar que este sí afecta en las mediciones. La madera que tienen una estructura multicapa que pueden ser dispersivas a frecuencias relativamente más altas cuando la longitud de onda es del mismo orden de magnitud que las dimensiones del cubo y grosor del anillo de crecimiento.

La densidad del material y su estructura interna provocan cambios que afectan a la propagación de las ondas ultrasónicas. La madera tardía y la madera temprana las propiedades de madera temprana y tardía son diferentes entre sí tienen diferentes densidades, las velocidades para la madera tardía son típicamente más altas que las de la madera temprana, afectando también a la atenuación.

La velocidad aumenta con el aumento de la frecuencia y disminuye con el aumento de la cantidad de deterioro, mientras que la atenuación aumenta con el aumento de la frecuencia y la cantidad de descomposición o de desintegración, mientras que las atenuaciones correspondientes aumentan con el aumento de la frecuencia y con la cantidad de desintegración.

Las mediciones de la velocidad longitudinal y transversal son sensibles a la dirección de propagación de la onda ultrasónica ya que la interacción entre el haz ultrasónico y la anatomía de la madera presenta una desviación y pérdida de dicho parámetro ultrasónico durante el paso de este en el medio analizado.

Finalmente considero que la aplicación de esta técnica es posible en casos reales y que ayudaría mucho a las personas involucradas en la conservación, preservación y restauración de sitios y monumentos históricos.

12 Recomendaciones

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser empleados para la realización de algún otro trabajo relacionado a la aplicación de técnicas de ultrasonido por el método de emisión transmisión en el análisis de maderas deterioradas por factores físicos y biológicos, sugiriendo lo siguiente:

- Antes de cualquier intervención en una edificación de carácter histórico es necesario conocer la normativa y los procedimientos que esta nos dicta.
- Familiarizarnos con el entorno del edificio o como se diría entre arquitectos leer al edificio y así identificar las áreas que presentan mayores problemas estructurales e identificar las causas.
- Utilizar este tipo de pruebas en conjunto con otras técnicas de inspección visual previas para determinar cuáles elementos estructurales requieren ser analizados con esta de ultrasonido y efectuar el muestreo.
- Tratar de que el porcentaje de humedad de los elementos seleccionados para la obtención de las muestras este en los estándares necesarios para la realización de pruebas mecánicas, esto para evitar que al momento de la extracción no se fracturen.
- Tener cuidado de clasificar correctamente las muestras marcando el área de edificio al que pertenece, el número de viga y el área de extracción en la viga.
- Utilizar transductores de frecuencias bajas para obtener mejores resultados.
- Tener claros las direcciones y sentidos de la madera antes de comenzar las mediciones.
- Colocar correctamente los transductores en las muestras de tal forma que estos queden a la misma altura, paralelos a la muestra.
- Tener cuidado con el registro de los datos obtenidos en relación con el sentido de medición.

Bibliografía

- Arriaga, Francisco , Miguel Esteban y Ignacio Bobadi. «www.recopar.org.» *Revista Electrónica*. junio de 2006.
- Instituto de Investigaciones , sobre Recursos. *Ciencia y Tecnología de la Madera*. Xalapa, Veracruz: LACITEMA, 1995.s.f.
- A. Badidi Boudas, S. Lebaili, A. Benchaala. «Grain Size influence on ultrasonic velocities and attenuation.» *NDT&E International* 36 (2003): 1-5.
- Agriculture, United States Departament of. *Wood Handbook, wood as Engineering Material*. Vol. 100 Years of Service. Madison, Wisconsin: Forest Products Laboratory, 2010.
- AIDIMA. *Patologías de la madera y su tratamiento > Símbolo de Calidad Blog > material*,. s.f.
- Ambrose, James. *Análisis y Diseño de Estructuras*. 2. Editado por Grupo Noriega. California: Limusa, 1998.
- . *Análisis y Diseño de Estructuras*. México: Limusa, S.A. de C.V., 2002.
- Baradit Erik, Peter Niemz, Arturo Fernández-Pérez. *Propiedades físico-mecánicas de algunas maderas nativas chilenas coníferas y latifoliadas por ultrasonido*. Madera. Ciencia y Tecnología. 25 de Abril de 2013.
- Behrisch, R. «Sputtering by Particle bombardment.» *Springer, Berlin*, 1981.
- Biodiversidad.gob.mx. *biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/plantas/pinos/pinos.html*. 27 de Abril de 2017.
- Blogs, AIDIMAS. *La conservación de estructuras de madera en el patrimonio histórico y arquitectónico*. s.f.
- C. Vazquez, R. Goncalves, C. Bertoldo. V. Baño, A. Vega, J. Crespo. M. Guaita. «Determination of the mechanical properties of Castanea sativa mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods.» *Springer-Verlang Berlin Heidelberg* 49 (2015).
- Carlos, Alcides López Gonzales Lorenzo. *Preparación de muestras para un microscopio electrónico de barrido* *Introducción a la Microscopia Electrónica*. 2009.
- Cartz, Louis. *Ultrasonic testing*. Nondestructive Testing, ASM International, The materials information society, s.f.
- Ceron C. M., Araujo M. A. y Solis R. L. «Norma de Clasificación Visual para Maderas Latifoleadas de uso Estructural.» *Boletín Académico n. 22 Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 1999.
- COFAN, Comisión Forestal de América del Norte. *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera*. México D. F: Consejo nacional de la madera en la construcción, A. C. (COMACO), 1999.
- Consejo internacional de sitios y monumentos, «Carta internacional sobre la conservación de monumentos y sitios .» // *Congreso internacional de arquitectos y técnicos de monumentos históricos, Venecia 1964*. Venecia, 1964. 4.
- Crecimiento Secundario madera.: <http://www.efn.uncor.edu/departamentos/biologia/intrbiol/maderas.htm>. 2011. (último acceso: Septiembre de 2016).
- Dirección General de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda. «Código Técnico de la Edificación .» 2006.

- Duque, María del Pilar. «Lecciones del concurso de puentes EIA.» *Envigado*, n° 1 (2004).
- Echenique Manrique R., Robles F.F. «Mecánica de la madera.» *Textos Universitarios* (Universidad Veracruzana), 1993.
- Elasticidad de las construcciones. <http://www.quieroapuntes.com/elasticidad-de-las-construcciones.html>. 2016. (último acceso: Marzo de 2017).
- Esteban, A. Guindeo Casaséus y L. García. *Anatomía e Identificación de las Maderas de Coníferas Españolas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes/Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, 1988.
- Fernández, Echenique R. y F. *Estructuras de madera*. 3 reimpresión. Balderas México: Limusa S. A. de C. V. , 1991.
- Francisco Arriaga, Miguel Esteban e Ignacio Bobadilla. «www.recopar.org.» *Revista Electrónica*. junio de 2006.
- Fuentes S, M. *Apuntes para el curso de tecnología de la Madera I Serie de apoyo académico No. 33*. Chapingo México : Universidad Autónoma de Chapingo, 1990.
- Hector Garcia a. http://www.proyectosalohogar.com/Fisica/La_densidad.htm. 2012. (último acceso: Agosto de 2017).
- Giuliano, Mario. <https://es.slideshare.net/cjvial/diseo-madera>. 2009. (último acceso: Mayo de 2016).
- Gnaedinger Silvia,. <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/ameg/v44n2/html/v44n2a05.htm>. 2017. (último acceso: Enero de 2018).
- Gobierno de España. «Ley de Ordenación de la Edificación.» Ley de Ordenación de la Edificación , Madrid, 1999/modificada 2001.
- H.Andersen, H.L.Bay, R.Behrisch, M. Robinson,H.E. Roosendaal, R Sigmund. «Sputtering by Particle Bombardment I, H.Andersen, H.L.Bay, R.Behrisch, M. Robinson,H.E. Roosendaal, R Sigmund, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981.» *Sputtering by Particle Bombardment I, H.Andersen, H.L.Bay, R.BehSpringer-Verlag Berlin Heidelberg New York* , 1981.
- Hardware, Restoration. <http://www.maxiapple.com/2013/12/rh-gramophone-dock-ipad-amplificateur-passif-bois-chene.html>. 2012. (último acceso: noviembre de 2017).
- He, Ping. «Dermination of ultrasonic parametersbased on attenuation and dispersion measurements.» *Ultrasonic imaging* 20 (1998): 275-285.
- Herbst, Silvia Gnaedinger y Rafael. <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/ameg/v43n1/html/v43n1a10.htm>. 2017. (último acceso: Enero de 2018).
- Herrero. Miguel Esteban, Ramón Arguelles Álvarez, Francisco Arriaga Martitegui, Guillermo Íñiguez González, y Ignacio Bobadilla Mldonado. *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*. Vol. 59. 506 vols. abirl-junio 2007.
- Historia, Instituto Nacional de Antropología e. <http://www.inah.gob.mx/es/red-de-museos/296-museo-y-archivo-historico-casa-de-morelos>. 2016.
- Hoadley, R. Bruce. *Understanding Wood: a craftsman´s guide to wood technology*. The Taunton Press, 2000.
- INAH. <http://www.inah.gob.mx/es/red-de-museos/296-museo-y-archivo-historico-casa-de-morelos>. 2016. (último acceso: 4 de noviembre de 2016).
- Javiersv. <https://es.slideshare.net/javiersv/madera-1>. 2013. (último acceso: Julio de 2016).

- Johnston, D. *La Madera Clases y Características*. Brcelona: CEAC, 1983.
- Justo José Barañao, Eduardo Augusto Penón, Elena Craig, Emiliano Cucciufo, Pablo De Falco. *Manual para la identificación de maderas con aumentos de hasta 10X*. Prod. Universidad Nacional de Luján. Luján, 2008.
- Katalin Kránitz, Markus Deublein, Peter Niemz. «Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices.» *RILEM*, 2013.
- Kollmann, F. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Vol. Tomo I. Madrid: Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y el Servicio de la Madera de Agricultura., 1999.
- . *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*. Vol. Tomo I. Madrid: Instituto Forestal de Investigación y Experiencias y el Servicio de la Madera de Agricultura., 1999.
- Krautkramer, Josef. *Physical principles of ultrasonic testing of materials*. 4 th fully resvised edition. Editado por Ultrasonic testig of materials. 1990.
- Kuilen, Natalia Yaitskova and Jan Willem van de. «Time- of-flight modeling of transversal ultrasonic scan of wood.» *PACS*, 2014: 3409-3415.
- Lista, restauración del Archivo Histórico Casa de Morelos. *www.oem.com.mx*. . 2011. (último acceso: 12 de junio de 2016).
- Maderas, Propiedades de las. <https://es.scribd.com/document/225951953/Propiedades-de-La-Madera>. 2014. (último acceso: Mayo de 2016).
- Martines, Maximo. *Los pinos Mexicanos*. segunda. México, 1948.
- Matikas, Stanislav I. Rokhlin and Theodore E. «Ultrasonic characterization of surfaces and interphases.» *MRS Bulletin*, 1996: 22-29.
- Manual de Clasificacion Visual para Madera. Estructural, *PADT-REFORT*. Cartagena : Grupo Andino, Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984.
- Manual para la identificación de maderas. forestales, <http://www.monografias.com/trabajos75/manual-identificacion-maderas-forestales/manual-identificacion-maderas-forestales2.shtml>. 2010. (último acceso: Octubre de 2017).
- Mc Govern Megan, Adam Senalik, George Chen, Frank C. Beall, Henrique Reis. «Effect of decay on ultrasonic velocity and attenuation measurements in wood.» Editado por Department of Industrial and Enterprise Systems Engineering. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering* (SPIE) 7981 (Marzo 2011): 13.
- McGovern Megan, Adam Senalik, George Chen, Frank C. Beall, Henrique Reis. «Effect of decay on ultrasonic velocity and attenuation measurements in wood.» Editado por Department of Industrial and Enterprise Systems Engineering. *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering* (SPIE) 7981 (Marzo 2011): 13.
- Miguel Esteban Herrero, Ramón Arguelles Álvarez, Francisco Arriaga Martitegui, Guillermo Íñiguez González, Ignacio Bobadilla Mldonado. *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*. Vol. 59. 506 vols. abiril-junio 2007.
- Morelos, História UVHM-Ficha de descripción archivística: Archivo Histórico Casa. *uvhm.edu.mx*. . s.f. (último acceso: 12 de junio de 2016).

- Morelos, Museo y Archivo Casa de. *CONACULTA/Sistema de Información Cultural*. 2016. (último acceso: 12 de junio de 2016).
- w.w.w.inah.gob.mx*. s.f. (último acceso: 12 de junio de 2016).
- Moreno, Teresa García. *Instructivos de Prácticas de Anatomía de la Madera 1*. Instructivo de Practicas, Laboratorio de Anatomía, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Morelia: Universidad Michoacána de San Nicolas de Hidalgo, 2010.
- Nagy, Peter B a. *Introduction to Ultrasonic*. University of Cincinnati, 1999.
- Nagy, Peter B b. «The role of acustics in characterizing porous media.» *Experimental methods in the physical sciences* 35 (1999): 161-215.
- Olmos, Gabriel. http://wiki.ead.pucv.cl/Gabriel_Olmos:_3%C2%B0_trimestre_2011. 2011. (último acceso: Octubre de 2016).
- Petroff, G.Y D. Normand. *The correlation between the physical and mechanical properties of paper and dimensional characteristics of fiber*. 1968.
- Popp, F. Bergner and K. «Mechanismo of ultrasonic attenuation in bainite low-alloy steel.» *Scripta metallurgica et materiali* 24 (1990): 1357-1362.
- pxhere. <https://pxhere.com/pt/photo/1172625>. 2017. (último acceso: Marzo de 2017).
- Robert. E., Green, Jr., Johns Hopkins. *Introduction to ultrasonic testing*. Columbus, Hoio: Contemporary nondestructive testing, s.f.
- Rodríguez V., E. 1998. Variación del largo de traqueidas dentro y entre árboles de *Pinus rudis* Endl. en Sierra las Alazanas, Arteaga, Coahuila. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. *Variación del largo de traqueidas dentro y entre árboles de Pinus rudis Endl. en Sierra las Alazanas, Arteaga, Coahuila. Tesis profesional*. Buenavista, Saltillo: Rodríguez V., E. 1998. Variación del largo de traqueidas dentro y entre árboles de *Pinus rudis* Endl. en Sierra las Alazanas, Arteaga, CoahuiUniversidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 52 p., 1998.
- Salas, Tomás. <https://es.slideshare.net/correovenymira/manual-de-construccin-de-viviendas-en-madera>. 2013. (último acceso: Febrero de 2016).
- Sandoz, J.L. «Nodestructive evalution of buildintimer by ultrasound.» Vancouber, Washigton: International symposium on nondestructive esting og wood, 1991.
- Sites, International Council on Monuments and. *Principios que debe regir la Conservacion de las Estructuras Historicas en Madera*. 1999.
- Sotomayor Castellanos Jabier Ramon y J Villaseñor Aguilar. *Velocidad de Onda de Esfuerzos y Módulos de Elasticidad de 4 Maderas Mexicanas*. Vol. 1. 2015.
- Sotomayor Castellanos Jabier Ramon, Ramirez Pérez, M. «Anisotropía del Módulo de Elasticidad y de Resistencia en Compresión de la Madera de *Pinus Douglasiana* y *pinus pringlei*.» *Acta Universitaria* 24, nº 5 (septiembre-octubre 2014): 3-12.
- Sotomayor Castellanos Jabier Ramon, Villaseñor AguilarJ. «Velocidad de Onda de Esfuerzos y Módulos de Elasticidad de 4 Maderas Mexicanas.» *Resista de Aplicación Científica y Técnica* 1, nº 1 (2015): 34-42.

- Sotomayor Castellanos Javier Ramón. «Análisis Estructural de Edificaciones Antiguas de Madera.» En *Tópicos en Tecnología de la Madera*, de Javier Ramón Sotomayor Castellanos, editado por Javier Ramón Sotomayor Castellanos, 130-140. Morelia, Michoacán: Laboratorio de Mécanica de la Madera, de la División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, 2017.
- Sotomayor Castellanos Javier Ramón. «Comportamiento en flexión estática de vigas de madera antigua de Picea abies.» Editado por Universidad De La Salle Bajío León. *Revista Electrónica Nova Scientia* 7, nº 13 (2014): 208-227.
- Sotomayor Castellanos Javier Ramón. «Variación del módulo de elasticidad dinámico de la madera según la técnica de evaluación.» En *Tópicos en Tecnología de la Madera*, editado por Javier Ramón Sotomayor Castellanos, 142-149. Morelia, Michoacán: Laboratorio de Mécanica de la Madera, de la División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, 2017.
- Tecnología de la. madera, <https://sites.google.com/site/tecnologiadelamadera/bibliografia>. 2009. (último acceso: Octubre de 2015).
- Tovar, Méndez, Campos, Yates III, Flores, D. D. Cibrian Tovar Méndez, Campos, Yates III, Flores. *Insectos Forestales de México*. México: Universidad Autónoma de Chapingo, 1995.
- Tumero, Pablo. <http://www.monografias.com/docs110/elasticidad-materiales-solidos/elasticidad-materiales-solidos.shtml>. 2010. (último acceso: Febrro de 2017).
- ultrasound, Measurement of elastic constants. 2001, 1-10.
- Villaseñor A., Rutiaga Q. *La madera de Casuarina equisetifolia L., química e índices de calidad de pulpa*. Vol. 6. Madera y Bosques , 2000.
- W. Chen, Y. Li, P. Shen, Z. Shui. «Microstructural developmet of hydrating portland cement paste at early ages investigated with non-destructive methodds and numerical simulation.» *Journal of nondestructive evaluation* 32 (2013): 228-237.
- William F.Smith, Javad Hashemi. *Fundamentos de la Ciencia y la Ingeniería de los Materiales*. cuarta. Mc Graw Hill, 2006.