



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LA
MADERA DE Balsa de Ecuador**

AUTORES:

Martínez Martínez, Miguel Antonio

Almeida Molina, Fernando Xavier

DIRECTOR:

Ing. Narváez Muñoz, Christian Patricio Msc.

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2017



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LA MADERA DE Balsa de Ecuador" realizado por los señores MIGUEL ANTONIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ y FERNANDO XAVIER ALMEIDA MOLINA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlos y autorizar a los señores MIGUEL ANTONIO MARTINEZ MARTINEZ y FERNANDO XAVIER ALMEIDA MOLINA para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 21 de marzo del 2017

Atentamente,

ING. CHRISTIAN PATRICIO NARVÁEZ MUÑOZ, MSC.

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, MIGUEL ANTONIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ, con cédula de identidad N° 1721106266 y FERNANDO XAVIER ALMEIDA MOLINA, con cédula de identidad N° 1721531562, declaramos que este trabajo de titulación "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LA MADERA DE Balsa de Ecuador" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra auditoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 21 de marzo del 2017

Miguel A. Martínez M.
CI: 1721106266

Fernando X. Almeida M.
CI: 1721531562



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, MIGUEL ANTONIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ y FERNANDO XAVIER ALMEIDA MOLINA, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LA MADERA DE Balsa de Ecuador" cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 21 de marzo del 2017

Miguel A. Martínez M.
CI: 1721106266

Fernando X. Almeida M.
CI: 1721531562

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mis padres Miguel y Catalina por su apoyo incondicional y su sacrificio a lo largo del transcurso de mi vida, por la confianza depositada en mí, por guiarme en ser ejemplo de lucha y superación, por sus consejos, sus valores. Sin su abnegación no estuviese donde estoy ahora.

A mis hermanos Christian y Henry que siempre han tenido palabras de aliento para esos momentos difíciles, que esto les sea como un ejemplo de motivación, humildad y superación.

Miguel.

Dedicado a mi familia, amigos y aquellas personas que me brindaron su apoyo durante el transcurso de mi carrera. Para aquellos que ya no están, pero que nunca se irán de mis pensamientos. Por cada frase dicha... por cada frase escrita. Este trabajo es para ellos.

Fernando.

Agradecimiento

A nuestras familias por ser refugio, amigo y un pilar fundamental en nuestras vidas. También, queremos agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales. Al grupo de docentes que ejercen en el laboratorio de mecánica de materiales por apoyarnos en los diferentes ensayos del presente trabajo.

A cada uno de nuestros profesores que durante el transcurso de la carrera profesional han aportado con un granito de arena a nuestra formación.

De igual manera agradecemos nuestro director de tesis de grado MSc. Cristian Narváez por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por sus consejos, por permitirnos ser parte del proyecto, por su constante seguimiento y ayuda. Al Ing. Luis Carrión por su predisposición y apoyo incondicional además de su capacidad para guiar nuestras ideas significando un aporte invaluable en el presente proyecto de investigación.

Finamente queremos agradecer a todas aquellas personas que de una u otra manera han constituido parte de nuestras vidas durante nuestra formación profesional compartiendo su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles. Algunas personas están con nosotros, otras en nuestros recuerdos y en nuestros corazones, pero sin importar el lugar donde se encuentren queremos darles las gracias por formar parte de nosotros.

Muchas gracias a todos

Miguel, Fernando

Índice General

Portada	ii
Certificado Tutor	ii
Autoría de Responsabilidad	iii
Autorización Biblioteca Virtual	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Resumen	xix
Abstract	xx
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Definición del Problema	6
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo General	8
1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. Justificación e Importancia	8
1.6. Alcance	9
2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1. Antecedentes investigativos	10

2.1.1.	Caracterización Dinámica en Madera - Técnicas de vibración transversal y Ondas de esfuerzo (END)	10
2.1.2.	MOE Dinámico y MOE Estático	15
2.2.	Vibración Transversal en vigas	17
2.3.	Generalidades vibración, amortiguamiento	19
2.3.1.	Vibración	19
2.4.	Vibración no amortiguada y amortiguada	20
2.4.1.	Vibración no Amortiguada	20
2.4.2.	Vibración Amortiguada	20
2.5.	Amortiguamiento	20
2.5.1.	Definición	20
2.5.2.	Tipos de amortiguamiento – Factor de amortiguamiento (ζ)	20
2.6.	Decreciente logarítmico (δ)	21
2.7.	Decrecimiento logarítmico histerético	22
2.8.	Aceleración en la Vibración	22
2.9.	Transformada de Fourier	23
2.10.	Espectro de Frecuencia	23
2.11.	Madera de Balsa	26
2.11.1.	Características del Árbol de Balsa	26
2.11.2.	Hábitat	27
2.11.3.	Partes del árbol de Balsa	27
2.11.4.	Corte del árbol de balsa y secado	30
2.11.5.	Propiedades direccionales de acuerdo al corte	30
2.11.6.	Composición y Estructura de la Balsa	34
2.11.7.	Peso y densidad de la Madera	35
2.11.8.	Propiedades mecánicas de la madera	36
2.12.	Adquisición de señales	37
2.12.1.	Introducción	37
2.13.	Sensores	37
2.13.1.	Sensor de Aceleración (Acelerómetro)	38
2.13.2.	Acelerómetro Capacitivo	38
2.13.3.	Sensor de fin de carrera	39
2.14.	Acondicionamiento de señales	40

2.14.1. Filtrado de señal	40
2.14.2. Banda de paso	40
2.14.3. Frecuencia de corte (FC).	41
2.14.4. Tasa de atenuación.	41
2.14.5. Filtros de paso bajo	41
2.14.6. Filtros de paso alto	41
2.14.7. Filtros de paso de banda	41
2.14.8. Filtros de parada de banda	42
2.15. Adquisición de Datos	43
2.15.1. Tarjeta de Adquisición de Datos	43
2.15.2. Hardware DAQ	43
2.15.3. Tipos de Señales	43
2.15.4. Conversor Analógico Digital (ADC)	44
2.15.5. Resolución del ADC (daq)	44
2.15.6. Frecuencia de muestreo	45
2.15.7. Teorema de Nyquist para muestreo	46
2.16. Software de adquisición de datos	46
3. DISEÑO EXPERIMENTAL	47
3.1. Técnicas para la toma de información	47
3.1.1. Tamaño de la muestra	47
3.1.2. Selección de la muestra	48
3.1.3. Propiedades Físicas	48
3.1.4. Propiedades Mecánicas	50
3.2. Instrumentos para la toma de información	53
3.2.1. Microestructura	53
3.2.2. Preparación de la muestra	54
3.2.3. Módulo de elasticidad dinámico (MOE)	55
3.2.4. Sistema de Sujeción	57
3.2.5. Sistema de Fuerza	57
3.2.6. Sistema de Adquisición de datos	59
3.2.7. Parámetros técnicos del equipo analizador de vibraciones	59
3.2.8. Selección del Sensor de Aceleración	60

3.2.9. Voltaje de Operación	60
3.2.10. Ancho de banda	61
3.2.11. Sensibilidad y Característica estática del Acelerómetro	61
3.2.12. Selección del Sensor de Posición	63
3.2.13. Medidor de Fuerza	63
3.2.14. Sistema de acoplamiento de señales a la DAQ	64
3.2.15. Circuito de Acoplamiento de señales	65
3.2.16. Software de Adquisición de datos	67
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
4.1. Estimación del tamaño de muestra	73
4.2. Selección de la muestra	75
4.3. Determinación de Humedad	76
4.4. Densidad	78
4.5. Análisis micro estructural de la madera de balsa	87
4.5.1. Dimensiones de las Células Prismáticas	89
4.5.2. Traqueidas	97
4.6. Obtención MOE Estática	103
4.7. Coeficiente de elasticidad [k]	108
4.8. Análisis Dinámico	111
4.8.1. Aceleración – Tiempo (Baja Densidad)	111
4.8.2. Aceleración – Tiempo (Alta Densidad)	113
4.8.3. Análisis comportamiento Dinámico Alta y Baja Densidad	114
4.8.4. Histograma de Frecuencias	116
4.9. Obtención MOE dinámico	117
4.10. Comparación MOE estático vs MOE dinámico	126
4.11. Análisis Dinámico en micro a macro estructura	128
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
5.1. Conclusiones	132
5.2. Recomendaciones	133
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

Índice de Figuras

Figura 1: Micrografía Celular de tronco de madera de balsa de los tres diferentes tipos de células que conforman	3
Figura 2: Micrografía de la sección tangencial del arreglo de las fibras con ángulo de des alineamiento.	4
Figura 3: Esquema del dispositivo de compresión de barra Hopkinson	5
Figura 4: Esquema de Ensayo para caracterización dinámica	5
Figura 5: Barra elástica de longitud L sujeta a un impacto	11
Figura 6: Propagación de la onda en el tiempo en una barra elástica por un impacto	12
Figura 7: Técnica utilizada para medir la velocidad de la propagación de la onda en maderas a través de un impacto inducido	13
Figura 8: Sistema de medición ultrasónico para impartir una onda longitudinal a un miembro de madera	13
Figura 9: Evaluación de ondas de esfuerzo de miembros de madera	15
Figura 10: Condiciones límite comunes para la vibración transversal de una viga	18
Figura 11: Puente Tacoma Narrows durante la vibración inducida por el viento.	19
Figura 12: Comparación del movimiento con diferentes tipos de amortiguamiento	21
Figura 13: Respuesta de una vibración libre de un sistema Subamortiguado	22
Figura 14: Respuesta de un sistema histeréticamente amortiguado	22
Figura 15: Señales en el dominio del tiempo y la frecuencia	24

Figura 16: Señal y Espectro de Frecuencias de Fibrilación Ventricular- Estudio Experimental	25
Figura 17: Árbol de Madera de balsa	26
Figura 18: Partes de un árbol de madera de balsa, copa, tronco, raíces	28
Figura 19: Elementos del Tronco de madera de balsa	29
Figura 20: Hojas y fruto del árbol de balsa	30
Figura 21: Distribución de los ejes con respecto a la dirección de la fibra y a los anillos de crecimiento.	32
Figura 22: Fotografía tipos de Grano (A) (B) Y (C)	33
Figura 23: Sección transversal del tronco de madera de balsa en sus diferentes cortes de grano	33
Figura 24: Micrografía de la sección transversal de la madera de balsa indicando los principales tipos de células	34
Figura 25: Estructura de la Fibra - Célula Prismática (Panel de Abeja).	35
Figura 26: Esquema de adquisición de datos	37
Figura 27: Masa en un modelo de resorte de un acelerómetro de un solo eje	38
Figura 28: Principio físico del acelerómetro capacitivo	39
Figura 29: Partes de sensor fin de carrera	39
Figura 30: Tipos de filtros para una señal de entrada de frecuencia.	42
Figura 31: DAQ NI-6009	43
Figura 32: Tipos de Señales con dominio del tiempo	44
Figura 33: ADC de una señal con resolución 3 y 13 bits	45
Figura 34: a) Tablones secados al medio ambiente, b) ingreso de los tablones al horno eléctrico, c) Pesado de las probetas con CH 12%	49
Figura 35: a) Esquema de ensayo a flexión estática, b) Zonas creadas por ensayo a flexión	51
Figura 36 Gráfica Carga – Deformación	52
Figura 37: Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE-SEM) Marca Tascan modelo MIRA 3 LMU.	54
Figura 38: Especímenes de baja densidad	55
Figura 39: Especímenes de baja densidad	55
Figura 40: Esquema de partes equipo de ensayos bajo régimen dinámico	56

Figura 41: Esquema de partes del sistema de sujeción.	57
Figura 42: Partes del sistema de Fuerza.	58
Figura 43: Componentes del sistema de adquisición de datos	59
Figura 44: Esquema del acelerómetro ADXL 335	60
Figura 45: Respuesta de salida y orientación a la gravedad	62
Figura 46: Sensor fin de carrera	63
Figura 47: Medidor de fuerza celda de carga	64
Figura 48: Disposición de pines DAQ NI 6009	65
Figura 49: Circuito de acoplamiento de señales para la DAQ	66
Figura 50: Esquema de conexiones sistema de adquisición de datos	66
Figura 51: Programa para adquisición de datos	68
Figura 52: Diagrama de bloques SAD	68
Figura 53: Esquema del módulo de mando SAD	69
Figura 54: Parámetros de configuración	70
Figura 55: Ejemplo de gráfica aceleración vs tiempo	71
Figura 56: Ejemplo de análisis espectral del SAQ	72
Figura 57: Histograma de frecuencias contenido de humedad	78
Figura 58: Micrografía de los diferentes tipos de células en madera de balsa de alta densidad	87
Figura 59: Micrografía Traqueidas en madera de balsa de baja densidad	88
Figura 60: Célula Prismática Madera de balsa alta densidad Espesor de pared (t), Longitud de lado de la celda (h)	89
Figura 61: Histograma Longitud de lado Células Prismáticas baja densidad	93
Figura 62: Histograma Longitud de lado Células Prismáticas alta densidad	93
Figura 63: Espesor de Borde - Células Prismáticas Baja vs Alta densidad	97
Figura 64: Relación Diámetro de Traqueidas baja vs alta densidad	100
Figura 65: Espesor de pared promedio de Traqueidas baja vs alta densidad	103
Figura 66: Módulo de Elasticidad de probetas de diferente densidad	107
Figura 67: Gráfica Coeficiente de Elasticidad vs Densidad	111
Figura 68: Gráfica Comportamiento Dinámico Balsa - Baja Densidad	112
Figura 69: Gráfico Comportamiento Dinámico Balsa - Alta Densidad	114
Figura 70: Comportamiento Dinámico de Baja vs Alta Densidad	115

Figura 71: Gráfico Incremento en Amplitud - Comportamiento Dinámico . . .	116
Figura 72: Histograma de Frecuencias (Frecuencias Naturales)	117
Figura 73: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 121,26 [kg/m ³]	120
Figura 74: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración 151,91[kg/m ³] . .	120
Figura 75: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración 192,92[kg/m ³] . .	121
Figura 76: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 197,75 [kg/m ³]	121
Figura 77: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 259,41 [kg/m ³]	122
Figura 78: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 299,34 [kg/m ³]	122
Figura 79: Amplitud espectral acorde a la densidad	123
Figura 80: Gráfico MOE Estático vs MOE Dinámico	127
Figura 81: Gráfico relaciones entre MOE longitudinal (El) y de flexión diná- mica (Ef) con MOE Estático	128
Figura 82: Esquema de la visión global del fenómeno de la experimentación .	128
Figura 83: Resumen resultados Micrografía Balsa baja vs alta densidad	129
Figura 84: Variación de la Amplitud Promedio - Comportamiento Dinámico .	130

Índice de Tablas

Tabla 1: Porcentajes Totales de Exportación de Madera de Balsa de Ecuador	7
Tabla 2: Países exportadores de madera de balsa al reino unido	7
Tabla 3 Correlaciones entre MOE Estático y MOE Dinámicos	16
Tabla 4: Especificaciones técnicas comparador de reloj Mitutoyo	51
Tabla 5: Especificaciones técnicas de la celda de carga	58
Tabla 5: Valores de Capacitores tanto en X, Y, Z acorde al ancho de banda deseado	61
Tabla 7: Tensión de salida para posiciones conocidas ADXL 335	62
Tabla 8: Ecuación característica Acelerómetro ADXL 335	62
Tabla 8: Parámetros de tamaños para muestras acorde al nivel de confianza	74
Tabla 9: Estudio preliminar de diez probetas	74
Tabla 10: Estimación del CH% en cada probeta	76
Tabla 11: Dimensiones sección transversal, longitudinal	79
Tabla 12: Cálculo del volumen de cada probeta	82
Tabla 13: Cálculo de la densidad para cada probeta	84
Tabla 14: Clasificación de las probetas por densidad	86
Tabla 15: Células Prismáticas - Longitud de Lado Baja Densidad	90
Tabla 16: Células Prismáticas - Longitud de Lado Alta Densidad	91
Tabla 17: Resumen parámetros de lado células prismáticas	92
Tabla 18: Células Prismáticas - Espesor doble Pared Baja densidad	94
Tabla 19: Células Prismáticas - Espesor doble Pared Alta densidad	95
Tabla 20: Resumen Parámetros Células Prismáticas - Espesor doble Pared	96

Tabla 21: Diámetro de Traqueidas Baja Densidad	98
Tabla 22: Diámetro de Traqueidas Alta Densidad	99
Tabla 23: Resumen Diámetro de traqueidas	99
Tabla 24: Espesor traqueidas baja densidad	101
Tabla 25: Espesor traqueidas alta densidad	102
Tabla 26: MOE estático baja densidad	105
Tabla 27: MOE estático Alta densidad	106
Tabla 28: Coeficiente de restitución elástica K acorde a la densidad	109
Tabla 29: Coeficiente de restitución elástica K acorde a la densidad	110
Tabla 30: Probetas análisis dinámico baja densidad	112
Tabla 31: Muestra patrón respecto a probetas de similares densidades	113
Tabla 32: Variación de la amplitud en balsa de baja y alta densidad	115
Tabla 33: Amplitud y frecuencia espectral acorde a la densidad	119
Tabla 34: Relación amplitud espectral con respecto a la densidad	123
Tabla 35: Condiciones límite para la vibración transversal de una viga con un extremo empotrado y un extremo libre	124
Tabla 36: MOE Dinámico vs Densidad Incremento porcentual	125

LISTADO DE SÍMBOLOS

- “g” o “G”: Aceleración de la gravedad en $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- μF : Microfaradios
- ADC: Convertidor analógico digital
- ASTM: American Society Test of Materials
- CH: Contenido de Humedad
- DAQ: Adquisición de datos
- DB: Decibelios
- FFT: Transformada rápida de Fourier
- I/O - E/S: Input/Output -Entrada/Salida
- MOE: Módulo de Elasticidad
- MOR: Módulo de Ruptura
- NI: National Instruments
- SAD: Software de adquisición de datos
- SEM: Microscopio de escaneado electrónico
- TDF: Transformada discreta de Fourier
- USB: Bus serial universal
- V: Voltaje
- VIN: Voltaje de entrada
- VMAX: Voltaje máximo
- VMIN: Voltaje mínimo

- VOUT: Voltaje de salida
- VRMS: Voltaje efectivo o real
- ω : Frecuencia angular

Resumen

El presente proyecto de investigación se plantea como objetivo realizar un análisis micro y macro del comportamiento de la madera de balsa de Ecuador frente a un régimen dinámico de vibraciones. En el primer caso se utilizó un microscopio electrónico de barrido de tecnología SEM, para la parte macroscópica se empleó un estudio por medio de vibraciones determinando las frecuencias naturales de una viga en condiciones de frontera “Empotrada-Libre”. Para el efecto, se construyó un banco de pruebas el cual consta de un acelerómetro adxl335, un sistema de acoplamiento y adquisición de datos mediante una tarjeta DAQ NIUSB 6009, además de un software tanto para la parte de toma de datos como el análisis estadístico. En este estudio se ensayó dos grupos de madera de balsa. De baja y alta densidad, obteniendo curvas de aceleración – tiempo, el espectro de frecuencias mediante la transformada rápida de Fourier, proporcionando la frecuencia de resonancia para el primer modo de vibración, a su vez se utilizó la ecuación de Euler Bernoulli en la obtención del MOE dinámico (Módulo de Elasticidad en flexión Dinámica) aplicado en el eje longitudinal. Finalmente, usando técnicas estadísticas, se concluyó que existe una relación entre la microestructura y la amplitud espectral, los valores de las frecuencias naturales de la viga en voladizo están afines con la densidad determinando que es un parámetro propio de cada espécimen.

Palabras Clave

- ANÁLISIS ESTADÍSTICO
- CARACTERIZACIÓN DINÁMICA
- ESPECTRO
- FRECUENCIA DE RESONANCIA
- MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN DINÁMICA

Abstract

This research project aims to analyze the dynamic vibration regime of Ecuadorian Balsa. The scanning electron microscope [SEM] was used in order to measure the cell dimensions, volume fractions and solid fractions. In addition, vibration study was used to determine the natural frequencies of wood beam in "Embedded-Free" boundary condition. For this purpose, a test bench was built using an adxl335 accelerometer, data acquisition and NIUSB 6009 DAQ card for coupling system, then software for both the data collection part and the statistical analysis was developed. Balsa wood of low and high density were tested, obtaining acceleration - time curves, the frequency spectrum by means of the fast Fourier transform, providing the resonance frequency for the first mode of vibration, in turn was used the Euler Bernoulli equation in obtaining the Dynamic flexural MOE (Dynamic flexural elastic Modulus) applied in the longitudinal axis. Finally, using statistical techniques, it was demonstrated that there is a relation between the microstructure and the spectral amplitude. Additionally, the values of the natural frequencies of the wood beam are related to the density.

Keywords

- DYNAMIC CHARACTERIZATION
- FREQUENCY HISTOGRAM
- FREQUENCY OF RESONANCE
- SPECTRUM
- DYNAMIC FLEXURAL ELASTIC MODULUS

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La caracterización dinámica es una metodología empleada para el análisis estructural de materiales bajo parámetros no destructivos, la evaluación no destructiva de materiales es la ciencia de la identificación de las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar su capacidad de uso final. Este tipo de caracterización es empleada para el conocimiento de propiedades como módulo de elasticidad dinámico, que a través de fuerzas de impacto permite conocer frecuencias de resonancia del elemento e identificar de forma rápida y fácil los parámetros elásticos del elemento.

La madera de balsa, así como las maderas en general son consideradas materiales ortotrópicos. Un material ortotrópico (ortótropo) es aquel que varía sus propiedades mecánicas en el eje en el que son medidos, es decir las mismas son diferentes en las direcciones de cada uno de sus ejes coordenados. Las respuestas dinámicas se basan en las curvas de aceleración-tiempo y su espectro de frecuencias del comportamiento de la madera de balsa en una vibración forzada debido a un impacto.

El presente proyecto de titulación describe el ensayo de probetas de madera de balsa en una viga en voladizo, teniendo un extremo empotrado, en su extremo opuesto se proporciona un impulso que genera la vibración. El desarrollo del proyecto involucra la construcción de un equipo experimental que logre medir la respuesta a este estímulo externo causante de la vibración.

Los trabajos relativos al estudio del comportamiento mecánico de la madera de balsa

se han centrado, en general, en ensayos estáticos. De hecho, existe escasa información sobre el comportamiento dinámico de la madera de balsa en el país, por ello se centró la investigación sobre la madera de balsa como elemento de viga trabajando en la zona elástica. A su vez la importancia del estudio ya que Ecuador es uno de los principales exportadores de madera de balsa en el mundo.

1.2. Antecedentes

Entre los estudios relacionados acerca de la caracterización de forma estática de la madera de balsa el trabajo realizado por Silva y Kyriakides en el año 2007 sobre “Compressive response and failure of balsa Wood” tuvo como objetivo la determinación de las propiedades elásticas e inelásticas bajo compresión axial en las tres dimensiones en función de la densidad de la madera de balsa. Este estudio estableció los modos de deformación a compresión en diferentes probetas cumpliendo con una relación de densidad relativa $\left[\frac{\rho}{\rho_s}\right]$ de madera de balsa en un rango $0,027 \leq \left[\frac{\rho}{\rho_s}\right] \leq 0,26$. La falla comenzó con el retorcimiento de las fibras en los planos axial – tangencial.

La microestructura de la madera de balsa está compuesta por largos y delgados rayos que forman cavidades llamadas traqueidas este tipo de células son las responsables de almacenar los hidratos de carbono del árbol. Las traqueidas constituyen el 80-90% de volumen del árbol. Los canales de transferencia o sap channels son los encargados de transferir los fluidos al tronco del árbol. En su conjunto global tienen una estructura en forma hexagonal tipo panel de abeja como se puede apreciar en la figura 1.

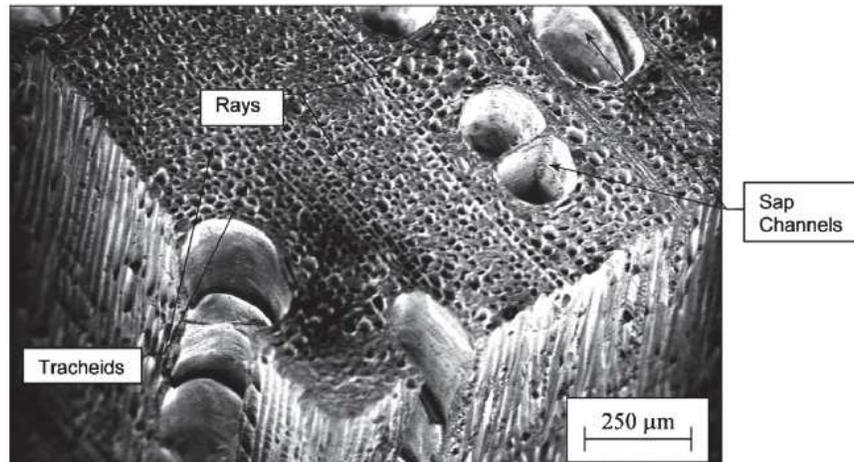


Figura 1: Micrografía Celular de tronco de madera de balsa de los tres diferentes tipos de células que conforman.

Fuente: (Silva & Kyriakides, 2007)

La propagación de la falla en los planos axial- tangencial ocurre por la falta de alineación homogénea de las fibras que se puede apreciar en la figura 2. El desalineamiento de las fibras es de 4° a 10° (Silva & Kyriakides, 2007). Este estudio determinó los esfuerzos de cizalladura de distintas probetas con diferentes densidades en un rango de densidad relativa entre $0,027 \leq \left[\frac{\rho}{\rho_s} \right] \leq 0,26$.

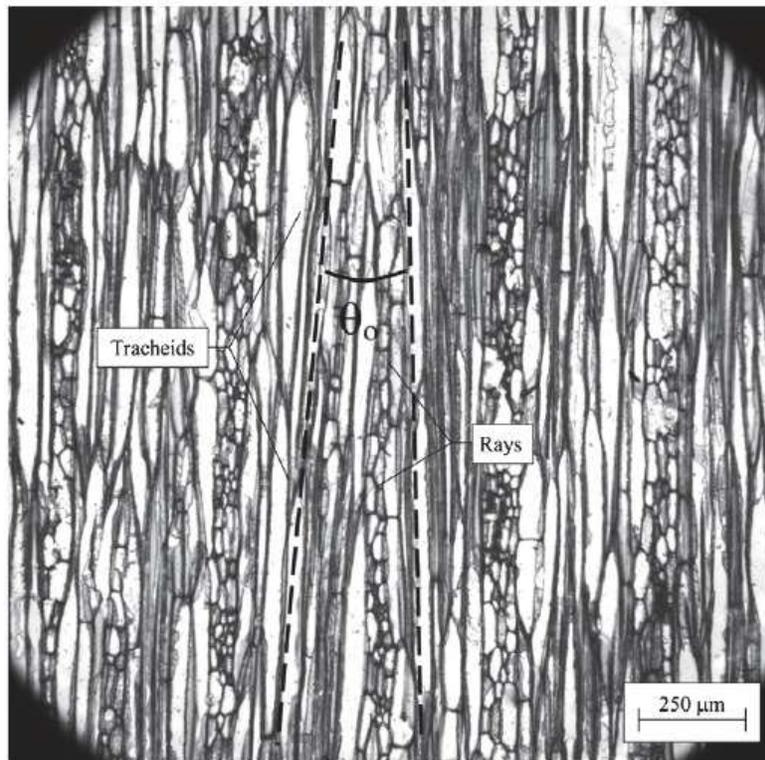


Figura 2: Micrografía de la sección tangencial del arreglo de las fibras con ángulo de desalineamiento.

Fuente:(Silva & Kyriakides, 2007)

En estudios relacionados con la caracterización dinámica de los materiales Khalifa y Barbero en su trabajo “Caracterización dinámica mediante barra Hopkinson de materiales cerámicos monolíticos y compuestos”, caracterizaron la compresión dinámica a alta velocidad de deformación de materiales cerámicos de alumina utilizando el dispositivo denominado barra Hopkinson.

El equipo barra Hopkinson de compresión es un dispositivo normalmente utilizado para materiales metálicos. Los ensayos en materiales cerámicos presentes en este estudio no son normalizados debido a limitaciones en el equipo por lo que se desarrollan metodologías propias. La barra Hopkinson contempla la utilización de dos barras de acero inoxidable conocidas como incidente y transmisora con sus caras planas y ortogonales a sus ejes. Entre cada barra se coloca una probeta cilíndrica del material a ensayar como se muestra en la Figura 3.

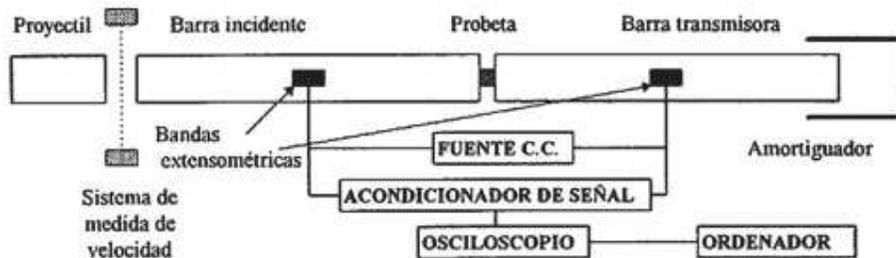


Figura 3: Esquema del dispositivo de compresión de barra Hopkinson
Fuente:: (Khalifa & Barbero, 2015)

Sobre la barra incidente se hace impactar un proyectil cilíndrico impulsado por aire comprimido. El impacto origina una onda de compresión que se propaga en la barra hasta llegar a la probeta donde parte se transmite a la segunda barra y parte se refleja (Khalifa & Barbero, 2015).

El tema propuesto acerca de la Caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador no es similar al estudio de Khalifa y Barbero. El experimento se describe como el ensayo de probetas de madera de balsa como una viga en voladizo, con un extremo empotrado y en su extremo opuesto, actuará una fuerza debido al golpe de un martillo (ver Figura 4). Se desea obtener respuestas de aceleración versus frecuencia natural de los especímenes, trabajando en zona elástica.

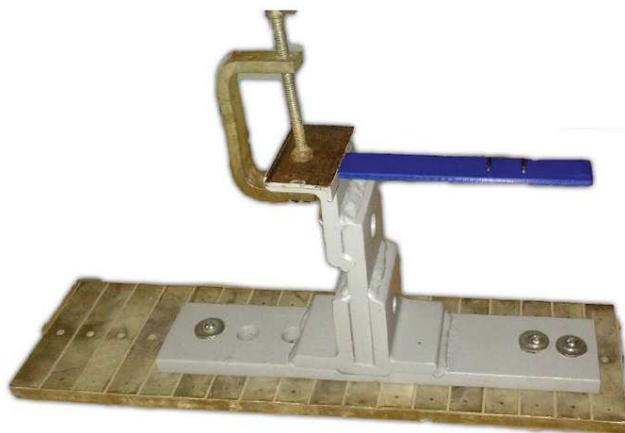


Figura 4: Esquema de Ensayo para caracterización dinámica
Fuente:: (Alejandro Ricardo Tcachuc)

En lo relativo a la producción de madera de balsa en el mundo el estudio realizado por Kotlarewski en 2014 señala que Ecuador es el mayor productor durante los últimos 60 años. La producción del 2008 suministró el 89 % de los mercados mundiales de balsa seguido de Papua New Guinea con 8 % (Kotlarewski, Belleville, Gusamo, & Ozarska, 2015).

Los resultados obtenidos por Kotlarewski en diferentes maderas de balsa del mundo señalan que las propiedades mecánicas de la madera de Papua New Guinea son inferiores en cuanto a resistencia a esfuerzos cortantes y módulo de elasticidad en comparación con la madera de balsa procedente de América del Sur -Ecuador (Kotlarewski, Belleville, Gusamo, & Ozarska, 2015)

1.3. Definición del Problema

En Ecuador un estudio realizado por estudiantes de la Universidad Técnica de Quedo sobre la “Caracterización del Cultivo de Balsa en la Provincia de Los Ríos,” señala que las provincias de mayor producción son Guayas, El Oro, Los Ríos y Pichincha con más de 20 mil hectáreas de plantaciones, entre bosques naturales y reforestados. Según El Boletín de Análisis de Mercados Internacionales de Julio a agosto del 2013, elaborado por ProEcuador (2013) muestra que Ecuador ocupa un lugar preponderante en las exportaciones de balsa en el mundo.

El 90 % de la producción se destina a la exportación. En Ecuador existen alrededor de 40 empresas destinadas a la exportación de madera de balsa según el Banco Central. El pequeño agricultor no tiene una participación significativa en procesos de industrialización y comercialización, pero forma parte de los procesos de siembra cosecha y post-cosecha por la cual las grandes empresas compran y recolectan la balsa de muchos de ellos. Las razones se deben que existen al buen manejo de los procesos de siembra (PROECUADOR, 2013). Según el Boletín de Análisis de Mercados Internacionales, se destaca el porcentaje de exportaciones de madera de balsa del Ecuador durante el período 2007 – 2013 que son apreciables en la tabla 1.

Tabla 1
Porcentajes Totales de Exportación de Madera de Balsa de Ecuador

País	Porcentaje del Total de Exportaciones
Estados Unidos	35.97 %
China	24.49 %
Alemania	8.65 %
Brasil	7.61 %
Dinamarca	6.67 %
Francia	5.72 %
España	4.83 %
Reino Unido	0.83 %

Fuente: Banco Central del Ecuador

El Boletín de Análisis de Mercados Internacionales de Julio a agosto del 2013, elaborado por ProEcuador (2013), registra que los principales proveedores de madera de balsa han sido Ecuador, Papua Nueva Guinea y Ghana. Ecuador en el segundo puesto como mayor exportador a Reino Unido, como se aprecia en la tabla 2.

Tabla 2
Países exportadores de madera de balsa al reino unido.

Años	Ecuador	Ghana	Papua Nueva Guinea
2013 (abril)	162,186	44,235	28,444
2012	151,274	150,667	112,133
2011	403,709	503,322	192,440
2010	322,986	508,917	168,872
2009	256,390	191,977	103,962
2008	59,859	262,038	101,784
2007	59,371	1886,774	104,626
TOTALES	1415,775	3647,930	812,261

Fuente: Banco Central del Ecuador

Actualmente Ecuador es el principal exportador de madera de balsa en el mundo y en la actualidad los estudios del comportamiento mecánico de la madera de balsa se han centrado, en general, en ensayos estáticos. De hecho, existe escasa información sobre el comportamiento dinámico de la madera de balsa en el país, por ello se centró la investigación sobre la madera de balsa como elemento de viga trabajando en la zona elástica obteniendo MOE dinámico curvas del comportamiento aceleración- tiempo y espectro de frecuencias.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Realizar la caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un banco de pruebas para la obtención de curvas dinámicas de la madera de balsa de Ecuador.
- Determinar curvas del comportamiento dinámico, Aceleración- tiempo, Espectro de Frecuencias y obtención del módulo de elasticidad dinámico en madera de balsa de Ecuador.
- Analizar los resultados obtenidos de la caracterización dinámica de la madera de balsa de Ecuador.

1.5. Justificación e Importancia

Actualmente el nivel de investigación acerca de la caracterización dinámica de la madera de balsa es escaso en el país, y los estudios antes mencionados por Kotlarewski, dan a conocer que la madera de balsa ecuatoriana brinda mayores propiedades mecánicas como resistencia a esfuerzos cortantes y módulo de elasticidad, en comparación con la madera de balsa procedente de Papua New Guinea (Kotlarewski, Belleville, Gusamo, & Ozarska, 2015). Esto, a su vez, hace necesario el estudio, ya que Ecuador es uno de los principales exportadores de madera de balsa debido a su alta producción, por su excelente rendimiento en el buen manejo de los procesos de siembra, cosecha y post-cosecha (PROECUADOR, 2013). Es por ello, que se requiere analizar las posibles aplicaciones creando fuentes de investigación y empleo.

1.6. Alcance

El presente proyecto de titulación tiene como principal alcance la caracterización de la madera de balsa de Ecuador mediante la obtención de Módulo de elasticidad a flexión dinámico y curvas del comportamiento aceleración- tiempo y espectro de frecuencias sometido a un estímulo externo causante de la vibración de la probeta. Mediante la experimentación es de vital importancia construir un banco de pruebas experimental capaz de medir las respuestas dinámicas de las probetas ensayadas. Dicho banco de pruebas debe contemplar las medidas necesarias para la atenuación del medio externo que causen interferencia con la vibración forzada que va adquirir el espécimen.

Se identificará las variables involucradas que influyen en el comportamiento dinámico de la madera de balsa. Se analizará la influencia de la densidad, grano y el tipo de corte en el que son cortadas las probetas. A partir de esta investigación se podrá desarrollar futuros estudios del comportamiento de la madera de balsa con materiales compuestos, de forma específica tipo sándwich.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes investigativos

2.1.1. Caracterización Dinámica en Madera - Técnicas de vibración transversal y Ondas de esfuerzo (END)

En el reporte realizado por Ross y Pellerin (1994), “Ensayos no destructivos para evaluar miembros de madera en estructuras” se destaca los primeros inicios del método de la caracterización dinámica en materiales como madera. Jayne en 1959, fundamento la hipótesis para ensayos no destructivos (END) en madera. En su tesis formula que el almacenamiento de energía y propiedades de disipación de materiales de madera, se puede medir de forma no destructiva mediante el uso de una serie de técnicas de ensayos no destructivos (Robert J. & Roy F.). En informes técnicos realizados por Troncoso y Palma en 2009, manifiestan que el módulo de elasticidad (MOE) y módulo a la ruptura (MOR) son representados por el almacenamiento y la disipación de la energía (Troncoso & Palma, 2009).

A nivel microscópico, las propiedades de almacenamiento de energía se controlan mediante la orientación de las células y la composición estructural, factores que contribuyen a la elasticidad y la resistencia estática. Tales propiedades son observables como frecuencia de oscilación en la transmisión de vibración o velocidad de sonido. Por el contrario, las propiedades de disipación de energía son controladas por características de fricción interna, cuyo comportamiento de unión entre los constituyentes contribuye

significativamente. La frecuencia de la vibración libre o las mediciones de atenuación de ondas acústicas se utilizan para observar las propiedades de disipación de energía en la madera y otros materiales (Robert J. & Roy F.).

Mediante la determinación de las frecuencias de naturales o resonancia se puede obtener de manera sencilla el MOE dinámico del elemento. Esta técnica permite conocer el comportamiento de los sólidos elásticos como por ejemplo en aplicaciones donde el elemento se encuentra a muy alta temperatura y criogénicas (Troncoso & Palma, 2009). Entre la normativa utilizada para evaluar los módulos de elasticidad dinámicos se encuentran normas como ASTM E1875 – 13 Y ASTM E1876 – 16 que dan a conocer los regímenes del experimento.

Entre una de las técnicas utilizadas se considera la aplicación de la teoría ondulatoria unidimensional a la barra elástica homogénea (Figura 5). Después de un golpe de impacto en un extremo de la barra, se genera una onda. Esta onda comienza inmediatamente a propagarse en la barra por medio de las partículas en el borde delantero de la onda que fueron excitadas inicialmente, mientras que las partículas en el borde de salida de la onda vienen a atenuarse pasando a un estado de reposo.

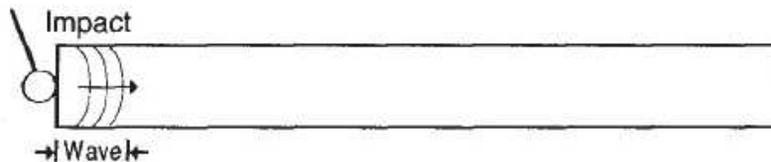


Figura 5: Barra elástica de longitud L sujeta a un impacto
Fuente: (Robert J. & Roy F.).

La energía se disipa a medida que la onda viaja a través de la barra; Por lo tanto, aunque la velocidad de la onda permanece constante, el movimiento de las partículas disminuye con cada paso sucesivo de la onda. Finalmente, todas las partículas de la barra se detienen. La supervisión del movimiento de una sección transversal cerca del extremo de la barra en respuesta a una onda de esfuerzo de propagación da lugar a formas de onda que consisten en una serie de pulsos igualmente espaciados cuya magnitud disminuye exponencialmente con el tiempo como se puede apreciar en la figura 6 (Robert J. & Roy F.).

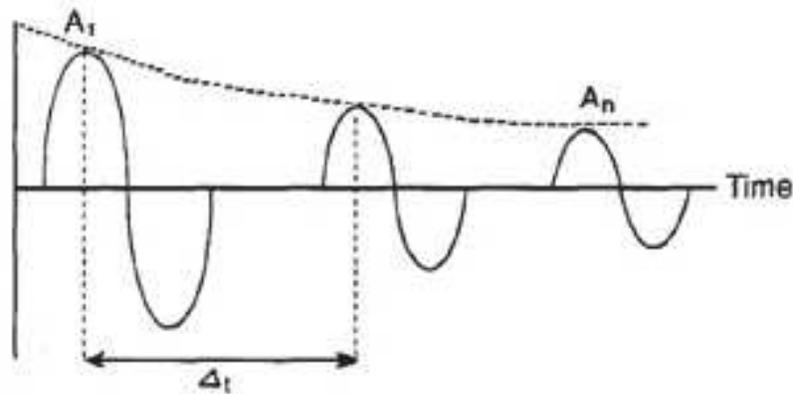


Figura 6: Propagación de la onda en el tiempo en una barra elástica por un impacto
Fuente: (Robert J. & Roy F.).

Ross y Pellerin mencionan que el MOE dinámico se puede calcular utilizando C y la densidad de la barra ρ . La velocidad de propagación C de dicha onda se puede determinar acoplado mediciones del tiempo entre los impulsos Δt y la longitud de la barra L como:

$$C = \frac{2L}{\Delta t} \quad (2.1)$$

$$MOE_{dinamico} = C^2 \rho \quad (2.2)$$

La madera al ser anisotrópica causa una incertidumbre en la teoría unidimensional (Robert J. & Roy F.). Sin embargo, la aplicación de la teoría mediante el examen de las formas de onda reales resultantes de las ondas de propagación en la madera y los productos de madera, se ha encontrado que la teoría de onda unidimensional es adecuada para describir el comportamiento de las olas en especímenes pequeños. Se encontró que la teoría podría ser usada para predecir con precisión los patrones de deformación dinámica (Kolsky, 1963).

Ross examinó el comportamiento de las ondas tanto en madera clara como en compuestos de madera y observó un excelente acuerdo con la teoría unidimensional (Robert J. & Roy F.). Una técnica comúnmente empleada en END de ondas de esfuerzo utiliza sistemas de medición simples del tipo de tiempo de vuelo para determinar la propaga-

ción de la velocidad de onda como se ilustra en la figura 7 y 8

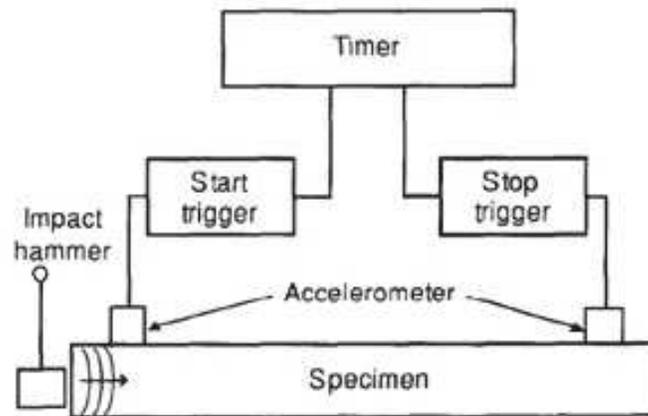


Figura 7: Técnica utilizada para medir la velocidad de la propagación de la onda en maderas a través de un impacto inducido.

Fuente: (Robert J. & Roy F.).

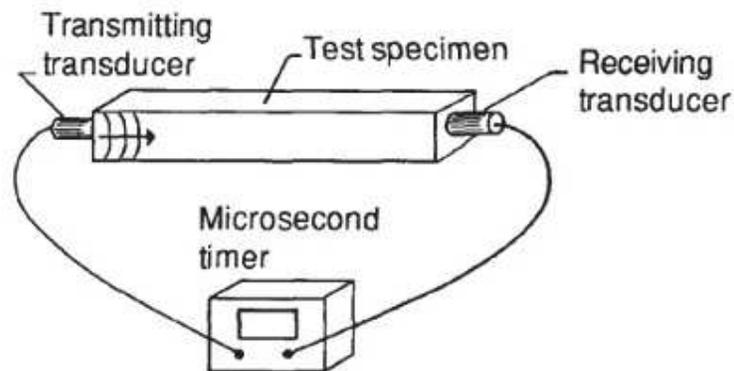


Figura 8: Sistema de medición ultrasónico para impartir una onda longitudinal a un miembro de madera.

Fuente: (Robert J. & Roy F.).

Se han llevado a cabo varios proyectos de investigación diseñados para examinar la aplicación de la teoría unidimensional a la propagación de las olas en madera clara,

madera aserrada y chapa de madera utilizando este tipo de mediciones. Estos proyectos realizados por Bell, Galligan y Courteau, Koch y Woodson, Porter y otros, examinaron las relaciones entre los valores de MOE obtenidos de las mediciones de ondas de esfuerzo y los medidos usando técnicas de prueba estática. Estas investigaciones, exponen que existe fuertes correlaciones entre el MOE dinámico y MOE estático, que van desde 0.92 a 0,98 (Robert J. & Roy F.).

Materiales compuestos a base de madera

La teoría unidimensional no solamente ha alcanzado su rango de aplicación en maderas, sino que a su vez se han aplicado a materiales compuesto a base de madera, la velocidad de propagación de la onda puede utilizarse para predecir el comportamiento a flexión de tableros aglomerados. Se dio a conocer que las características de unión y compactación para materiales compuestos puede ser fácilmente registrados por la velocidad de propagación de la onda, siendo muy específico sensible a cualquier cambio en el tablero aglomerado. (Robert J. & Roy F.)

Varias técnicas de Ensayos no Destructivos (END)

Técnicas de Vibración Transversal

Las técnicas de vibración transversal basada en proporcionar un estímulo debido a un impacto para medir la respuesta dinámica, también están significativamente influenciadas por las condiciones del entorno. Tales condiciones con frecuencia no existen con miembros de madera en estructuras. Por consiguiente, el uso de esta técnica también ha sido limitado para evaluaciones in situ. Una técnica basada en END de vibración transversal para evaluar postes de madera consistía en medir la respuesta vibratoria de un poste después de ser golpeado por un mazo de goma. Se identificó la frecuencia de resonancia del polo y se usó para inferir la fuerza del polo (Robert J. & Roy F.).

Técnicas de Ondas de Esfuerzo

Las técnicas longitudinales de END de onda de esfuerzo para evaluar miembros de madera en estructuras han demostrado que la influencia que tienen las condiciones de

los límites en las mediciones de la transmisión de la velocidad de sonido es significativamente menor que la de las técnicas de flexión estática o de vibración transversal. Por lo tanto, las técnicas de END de onda de esfuerzo longitudinal para la evaluación in situ de miembros de madera han sido prometedoras. En un ejemplo (figura 9) se tiene la estructura conocida como TRESTLE una de las más grandes del mundo. Está situado en la base de la fuerza aérea de Kirkland, New México (Robert J. & Roy F.).

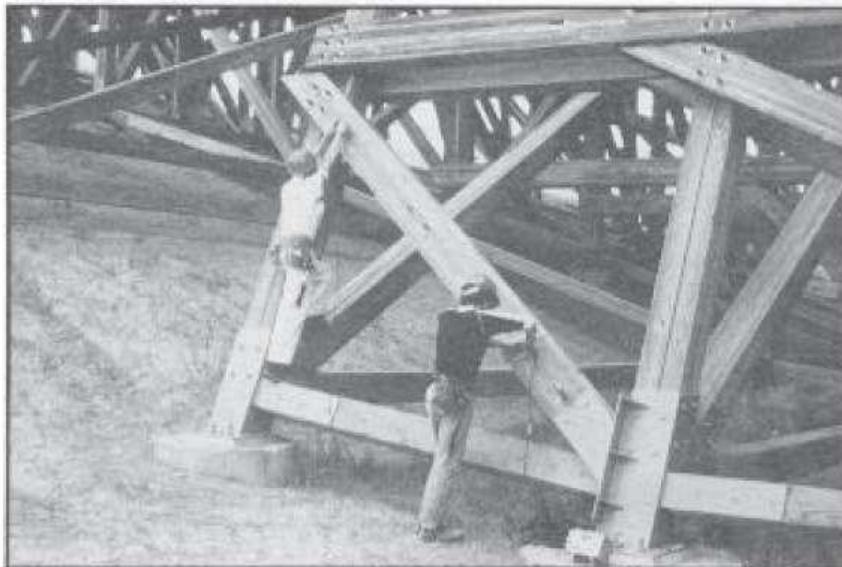


Figura 9: Evaluación de ondas de esfuerzo de miembros de madera de TRESTLE.
Fuente: (Robert J. & Roy F.).

Los esfuerzos de evaluación in situ se han centrado principalmente en las adaptaciones de técnicas de END de ondas de esfuerzo. Estas técnicas han mostrado considerables promesas, son relativamente fáciles de usar y tienen bajos costos de equipo.

2.1.2. MOE Dinámico y MOE Estático

Entre los estudios anteriores sobre relaciones de MOE Dinámico con MOE estático, la investigación hecha por Ilic en el 2001 revela la alta correlación que existe entre estos 2 métodos para la obtención de módulos de elasticidad a probetas de maderas de Eucalipto (*Eucalyptus delegatensis* R.Baker, por su nombre científico) 20 x 20 mm de sección transversal y 300 mm de longitud. Comparadas con las técnicas de ensayos

no destructivos por vibración transversal y de ondas de esfuerzo. Ilic identifica las correlaciones que existen entre MOE estático y MOE de flexión dinámico (obtenido de la técnica de vibración transversal), del mismo modo MOE estático con MOE longitudinal dinámico (utilizando la técnica de ondas de esfuerzo).

Entre los resultados obtenidos en el estudio “Relación entre las propiedades elásticas dinámicas y estáticas en aire seco de la Madera de Eucalipto” (J.Ilic, 2001) se determinaron que las correlaciones entre usar método dinámico no varían significativamente en la obtención del módulo de elasticidad. Cabe mencionar que el módulo de elasticidad estático con el que se está comparando es un módulo longitudinal a flexión. Las correlaciones de la investigación de Ilic (2001) presenta los siguientes valores mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Correlaciones entre MOE Estático y MOE Dinámicos

Correlación	MOE longitudinal Dinámico (E_L)
MOE Estático	0,95

Correlación	MOE de Flexión Dinámico (E_F)
MOE Estático	0,99

Correlación	MOE de Flexión Dinámico (E_F)
MOE longitudinal Dinámico (E_L)	0,98

Fuente: (J.Ilic, 2001)

Ilic en otro estudio realizado en 2003 acerca de “Dynamic MOE of 55 species using small wood beams” da a concluir que las técnicas de resonancia son útiles para proporcionar una indicación del MOE y por lo tanto la calidad de madera seca. Las vibraciones de resonancia y el análisis espectral forman un medio adecuado, conveniente y simple para determinar las propiedades elásticas de la madera de diferentes tamaños hasta pequeñas vigas de madera y con casos de dimensiones de mayor espesor y longitud. El enfoque puede ser útil para la selección para la cría de árboles y la evaluación de los efectos del cultivo, tipo de suelo y clima sobre las propiedades elásticas de la madera

(Ilic, 2003).

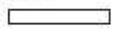
2.2. Vibración Transversal en vigas

La vibración transversal libre y forzada de vigas se considera en el capítulo 11 de Singiresu S. Rao en su libro titulado “Vibration of Continuous Systems” presentan las ecuaciones de movimiento de una viga deriva de las teorías de Euler-Bernoulli, de Rayleigh, y de Timoshenko. La teoría de Euler-Bernoulli descuida los efectos de la inercia rotatoria y la deformación por cizallamiento y es aplicable a un análisis de vigas delgadas. La teoría de Rayleigh considera el efecto de la inercia rotatoria, y la teoría de Timoshenko considera los efectos de la inercia rotatoria y de la deformación por cizallamiento.

La teoría de Timoshenko se puede utilizar para vigas gruesas. Las ecuaciones de movimiento para la vibración transversal en vigas están en forma de ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden con dos condiciones de contorno en cada extremo. Las respuestas bajo cargas móviles, vigas sometidas a fuerza axial, en rotación, vigas continuas y vigas sobre cimentación elástica se consideran usando teoría de haz delgado (Euler-Bernoulli). La solución de vibración libre, incluyendo la determinación de frecuencias naturales y formas de modo, se considera de acuerdo con las tres teorías (Rao, Vibration of Continuous Systems, 2007). En determinación de las frecuencias naturales de la vibración transversal en vigas, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad (2.3)$$

Donde ω es la frecuencia angular de vibración. Y los coeficientes βl puede ser determinados por las condiciones límites (condiciones de frontera) y los diferentes modos de vibración de la viga, se presenta a continuación en la figura 10. Coeficientes βl para las diferentes configuraciones.

Condiciones en los extremos de la viga	Ecuación de frecuencia	Modo (función normal)	Valor de $\beta_n l$
Ambos extremos articulados 	$\text{sen } \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n[\text{sen } \beta_n x]$	$\beta_1 l = \pi$ $\beta_2 l = 2\pi$ $\beta_3 l = 3\pi$ $\beta_4 l = 4\pi$
Ambos extremos libres 	$\text{cos } \beta_n l \cdot \text{cosh } \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n[\text{sen } \beta_n x + \text{senh } \beta_n x + \alpha_n (\text{cos } \beta_n x + \text{cosh } \beta_n x)]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l - \text{senh } \beta_n l}{\text{cosh } \beta_n l - \text{cos } \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4.730041$ $\beta_2 l = 7.853205$ $\beta_3 l = 10.995608$ $\beta_4 l = 14.137165$ ($\beta l = 0$ para el modo de cuerpo rígido)

Continua...

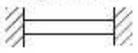
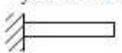
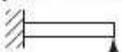
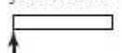
Condiciones en los extremos de la viga	Ecuación de frecuencia	Modo (función normal)	Valor de $\beta_n l$
Ambos extremos empotrados 	$\text{cos } \beta_n l \cdot \text{cosh } \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n[\text{senh } \beta_n x - \text{sen } \beta_n x + \alpha_n (\text{cosh } \beta_n x - \text{cos } \beta_n x)]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\text{senh } \beta_n l - \text{sen } \beta_n l}{\text{cos } \beta_n l - \text{cosh } \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4.730041$ $\beta_2 l = 7.853205$ $\beta_3 l = 10.995608$ $\beta_4 l = 14.137165$
Un extremo empotrado y el otro libre 	$\text{cos } \beta_n l \cdot \text{cosh } \beta_n l = -1$	$W_n(x) = C_n[\text{sen } \beta_n x - \text{senh } \beta_n x - \alpha_n (\text{cos } \beta_n x - \text{cosh } \beta_n x)]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l + \text{senh } \beta_n l}{\text{cos } \beta_n l + \text{cosh } \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 1.875104$ $\beta_2 l = 4.694091$ $\beta_3 l = 7.854757$ $\beta_4 l = 10.995541$
Un extremo empotrado y el otro articulado 	$\tan \beta_n l - \tanh \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n[\text{sen } \beta_n x - \text{senh } \beta_n x + \alpha_n (\text{cosh } \beta_n x - \text{cos } \beta_n x)]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l - \text{senh } \beta_n l}{\text{cos } \beta_n l - \text{cosh } \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3.926602$ $\beta_2 l = 7.068583$ $\beta_3 l = 10.210176$ $\beta_4 l = 13.351768$
Un extremo articulado y el otro libre 	$\tan \beta_n l - \tanh \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n[\text{sen } \beta_n x + \alpha_n \text{senh } \beta_n x]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\text{sen } \beta_n l}{\text{senh } \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3.926602$ $\beta_2 l = 7.068583$ $\beta_3 l = 10.210176$ $\beta_4 l = 13.351768$ ($\beta l = 0$ para el modo de cuerpo rígido)

Figura 10: Condiciones límite comunes para la vibración transversal de una viga
Fuente: (Rao, Vibration of Continuous Systems, 2007)

2.3. Generalidades vibración, amortiguamiento

2.3.1. Vibración

Se define como cualquier movimiento que se repite en un intervalo de tiempo. El estudio de las vibraciones se fundamenta en los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas que involucran dicho movimiento (Rao, 2012). En el campo de la ingeniería las vibraciones son de vital importancia en la construcción y diseño de máquinas, cimientos, estructuras, motores, turbinas y sistemas de control.

En construcciones civiles se han visto las mayores catástrofes debido a la des importancia e incorrecto estudio de las vibraciones. En la figura 11 se presente un ejemplo de catástrofe del puente Tacoma Narros durante la vibración inducida por el viento.



Figura 11: Puente Tacoma Narros durante la vibración inducida por el viento.
Fuente: (Rao, 2012)

2.4. Vibración no amortiguada y amortiguada

2.4.1. Vibración no Amortiguada

Es aquella vibración en la que no existe pérdida o disipación de energía por fricción durante la oscilación. En algunas aplicaciones físicas el amortiguamiento es muy pequeño que puede llegar a ser despreciable (Rao, 2012).

2.4.2. Vibración Amortiguada

Es aquella vibración en la que existe pérdida o disipación de energía por fricción durante la oscilación (Rao, 2012).

2.5. Amortiguamiento

2.5.1. Definición

Se conoce como la reducción gradual de la energía en respuesta de la disminución del desplazamiento de un sistema que puede convertirse en calor o en sonido (Rao, 2012). Una definición general de amortiguamiento se conocer como la capacidad de un sistema o cuerpo que disipa energía cinética en otro tipo de energía.

2.5.2. Tipos de amortiguamiento – Factor de amortiguamiento (ζ)

El factor de amortiguamiento se define como la relación entre la constante de amortiguamiento (c) y la constante de amortiguamiento crítico (c_c) (Rao, 2012).

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.4)$$

Cuando la relación entre las dos constantes cambia, el comportamiento de la curva da lugar a los tipos de amortiguamiento conocidos, en la figura 12 se ilustra el comportamiento cuando la constante de amortiguamiento varía entre valores mayores, menores o iguales a 1 y cero.

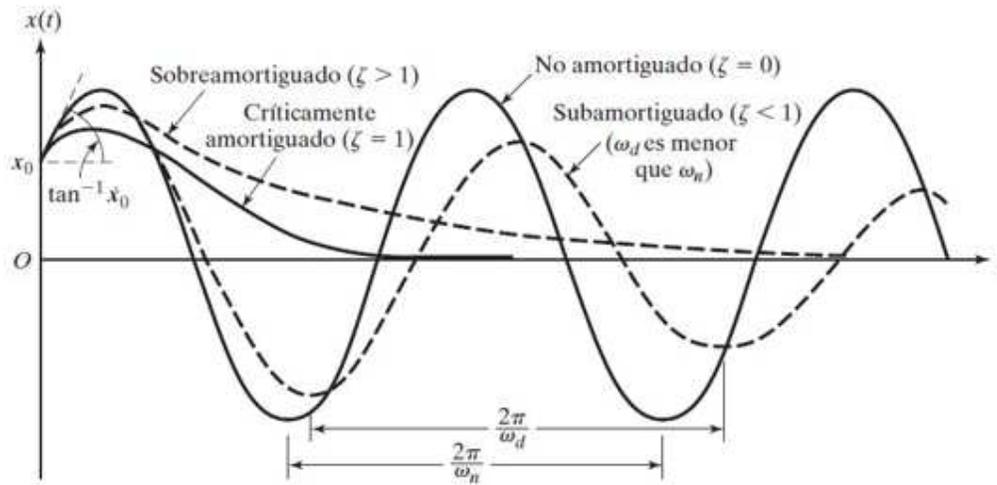


Figura 12: Comparación del movimiento con diferentes tipos de amortiguamiento
Fuente: (Rao, 2012)

2.6. Decreciente logarítmico (δ)

Se define como la velocidad a la cual se reduce la amplitud de una vibración amortiguada en el caso más práctico una vibración subamortiguada. Es el logaritmo natural de la relación de las dos amplitudes sucesivas (Rao, 2012). Se caracteriza por representar la curva que pasa por las crestas de la ecuación general del movimiento subamortiguado. Un ejemplo representativo se encuentra en la figura 13, de una vibración libre amortiguada $X e^{(-\xi \omega t)}$.

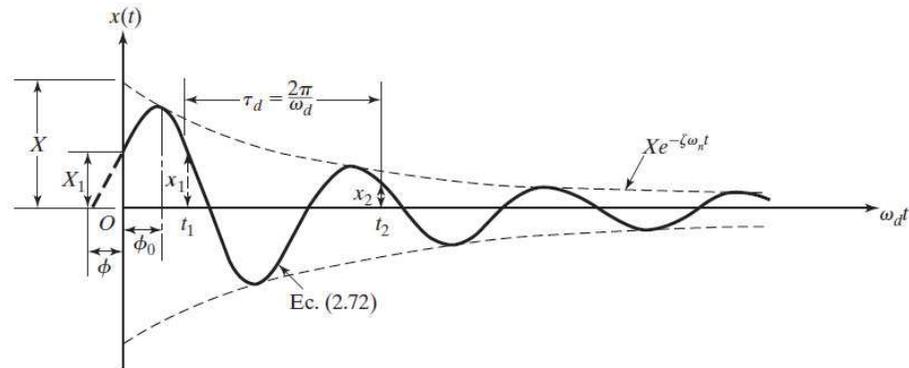


Figura 13: Respuesta de una vibración libre de un sistema Subamortiguado – Decrecimiento Logarítmico $X e^{-\xi \omega t}$
Fuente: (Rao, 2012)

2.7. Decrecimiento logarítmico histerético

Se define como el logaritmo natural de la relación de las energías que se presentan en dos puntos como P y Q. Se ilustra en la figura 14.

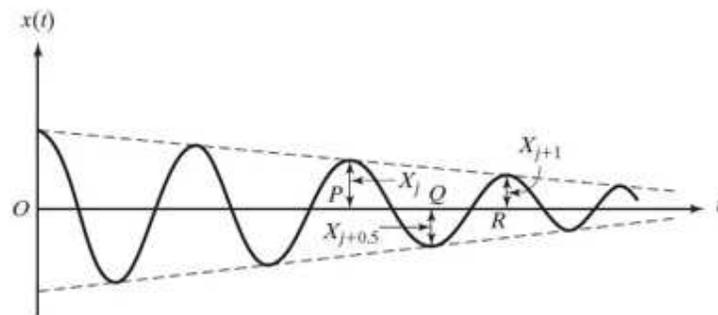


Figura 14: Respuesta de un sistema histeréticamente amortiguado
Fuente: (Rao, 2012)

2.8. Aceleración en la Vibración

A la tasa de cambio de la velocidad con respecto a un tiempo determinado se lo conoce como aceleración, siendo esta una característica importante en el fenómeno de

vibración, describe la razón de incremento de velocidad hasta aproximarse al límite superior, a su vez el valor del decremento para alcanzar su límite inferior de la oscilación.

2.9. Transformada de Fourier

Anteriormente se analizó las vibraciones en el dominio del tiempo, que son señales directas proporcionadas por el equipo. Pero estas señales tienen una estructura muy compleja, en vista de que comprende características propias de la oscilación lo cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista su comportamiento ante un análisis óptimo de la señal. Actualmente existen varios métodos para realizar un estudio de vibraciones, entre los cuales tenemos la señal en su dominio de frecuencia.

La transformada de Fourier es una transformación matemática que es ampliamente utilizada para convertir una señal en el dominio del tiempo a una señal de dominio de la frecuencia o viceversa sin alterar la información contenida en esta. Es utilizada para el estudio de señales no periódicas (Ujaen, 2005). En cambio, la FFT sirve para describir de manera más precisa el desarrollo de señales periódicas mediante la constitución de series de senos y cosenos que, cuando se superponen, representarán la función.

La transformada inversa de Fourier

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt \quad (2.5)$$

La transformada directa de Fourier es

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.6)$$

2.10. Espectro de Frecuencia

Es la representación gráfica de la amplitud de una señal de forma compleja en el dominio de la frecuencia como se muestra en la figura 15. Todas las señales y formas de onda tienen un espectro de frecuencia. Puede entenderse como la representación del volumen de una hoja de papel, a simple vista es despreciable, pero si se tiene un conjunto

finito de hojas de papel, se podría ver y medir su volumen. De manera similar, cuando sumamos un número infinito de ondas seno con amplitudes diferentes, podremos medir la densidad de frecuencias, y esta densidad de frecuencias será más alta alrededor de algunas frecuencias que otras.

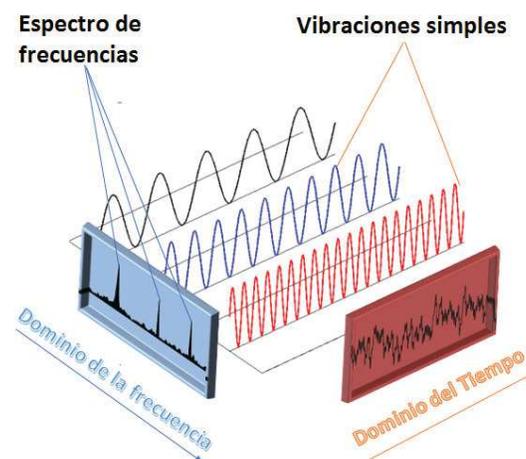


Figura 15: Señales en el dominio del tiempo y la frecuencia

A esto se refiere como el espectro de frecuencia de una forma de onda compleja, en la figura 16 se muestra un estudio experimental de la fibrilación ventricular, donde aparece las pulsaciones por segundo de episodios epicárdicos que mediante la transformada de Fourier se obtiene la gráfica de amplitudes de los episodios en dominio de la frecuencia.

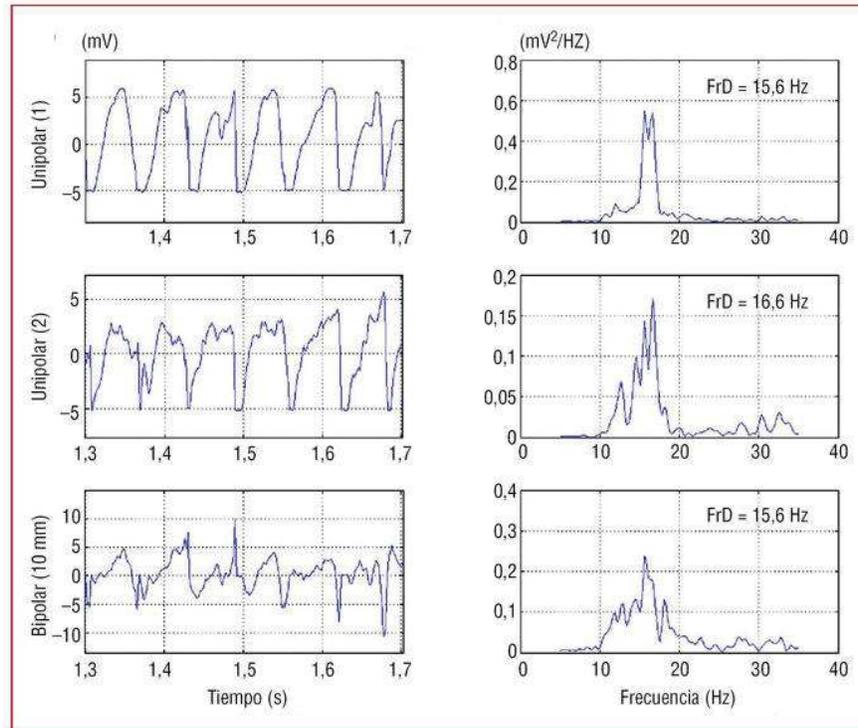


Figura 16: Señal y Espectro de Frecuencias de Fibrilación Ventricular - Estudio Experimental

Fuente: (Revista Española de Cardiología, 2007)

Cuando las señales y formas de onda interactúan con objetos físicos, su espectro de frecuencia se altera. Mediante la comprensión de cómo los espectros de frecuencia se alteran, podemos entender cómo las señales y formas de onda se alteran. Las señales y formas de onda que vemos en la vida real tienen un principio y un final. Sin embargo, cada una de estas señales y formas de onda puede ser pensada como la combinación de un número infinito de ondas sinusoidales, y cada onda sinusoidal no tiene comienzo ni fin.

2.11. Madera de Balsa

2.11.1. Características del Árbol de Balsa

Los árboles de balsa son considerados como maleza pionera de las regiones Costeeras y Amazónicas del Ecuador propia de climas tropicales. Naturalmente crecen en los bosques lluviosos húmedos de América Central y del Sur. Se extiende al sur desde Guatemala, a través de Centroamérica, la costa noreste de Sudamérica hasta Bolivia. Sin embargo, Ecuador es la principal fuente productora de madera de balsa.

La madera de balsa es también conocida en su nombre científico como *Ochroma Lagopus*, en el ámbito popular se la denomina palo de balsa, boya, pertenece a la familia de las Bombacaceae. Es considerado una especie de crecimiento rápido ya que en promedio el árbol se desarrolla de 2 a 3 metros anuales. Con un diámetro de que va desde los 30 a 90 centímetros de tronco cilíndrico vertical y libre de ramas, como se puede observar en la figura 17. (EcuadorForestal, 2012).



Figura 17: Árbol de Madera de balsa

La balsa destaca sobre las diferentes maderas existentes en el mercado ya que al poseer densidades muy bajas tiene una alta resistencia. Además, ayuda a la fácil regenera-

ción en la reforestación productiva. Ésta especie tiene la capacidad de restaurar terrenos abandonados y degradados por acciones de tala y quema ayudando a su vez el control de la erosión del suelo.

2.11.2. Hábitat

La balsa se desarrolla en lugares donde la temperatura oscila entre los 22° y los 27° C, con una cantidad de precipitaciones de 1.300 a 1.500 milímetros anuales, aunque es posible desarrollarse con precipitaciones de 500 milímetros anuales. (EcuadorForestal, 2012). Un crecimiento óptimo se lo consigue en suelos arenosos, arcillosos o margosos, pero con una buena exposición a la luz solar y buena aireación.

No tolera suelos con niveles bajos de humedad y en suelos superficiales es susceptible de volcamiento por vientos fuertes. El crecimiento en sitios desfavorables y las lesiones causadas a los árboles, conducen a la producción de madera pesada y de baja calidad. No soporta suelos anegados ni heladas. (EcuadorForestal, 2012).

2.11.3. Partes del árbol de Balsa

El árbol de balsa está formado por tres partes principales, el tronco, la copa y las raíces como se puede observar en la figura 18.

El tronco constituido de un material heterogéneo, integrado por un conjunto de células diferentes ya que cada una de ellas tiene funciones específicas, como la conducción de savia, la transformación de productos, así como el almacenamiento de sustancias de reserva y el sostenimiento del árbol, mantiene una sección vertical y cilíndrica.

Está formado por varias zonas, entre las cuales tenemos a la corteza constituyendo la capa exterior de color gris tendiendo a un color café, compuesta por materia inerte de aspecto resquebrajado, continuando en dirección interna radial se encuentra la xilema, desempeñando el papel de soporte conducción y almacenamiento de nutrientes.

Posteriormente se localiza el cambio o cambium, denominado así a un anillo continuo de tejido generador de células, es decir, donde se produce el crecimiento del árbol (figura 19). (NCH173OF.74, 2013).

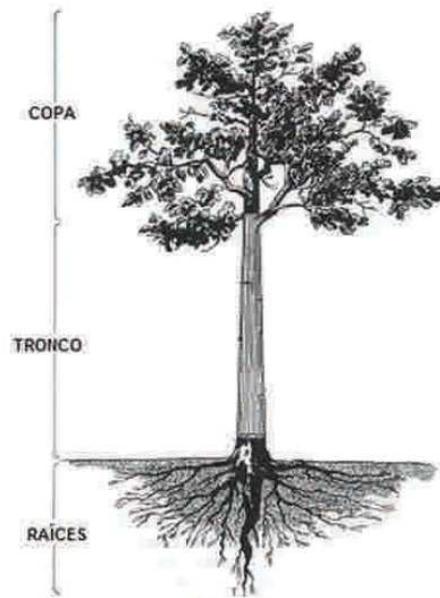


Figura 18: Partes de un árbol de madera de balsa, copa, tronco, raíces
Fuente: (NCH173OF.74, 2013)

En el interior de la zona del cambio se puede diferenciar la albura siendo estas células encargadas del sostén y traslado de agua y nutrientes. Continuando en dirección radial al centro del tronco se tiene el duramen, compuesto por células inactivas, pero que mantienen la función de sostén. En el centro del árbol se encuentra la médula, siendo éste un tejido inactivo sin función específica como se puede apreciar en la figura 19. (NCH173OF.74, 2013).

Cabe mencionar que en el tronco se puede apreciar los anillos de crecimiento los cuales pueden describir la zona y el clima de crecimiento, pueden ser de dos tipos anuales, y estacionales, los primeros se desarrollan en zonas boreales, los segundos son propios de regiones cálidas húmedas con estaciones climáticas pronunciadas. Dentro de cada anillo de crecimiento la madera formada en primavera (llamada madera de primavera en el caso de los anillos anuales, y de primer crecimiento en los anillos estacionales), la madera formada en verano (madera de verano en los anillos anuales, y tardía en los estacionales). (Acuña y Casado, 2005).

De acuerdo con Winandy (1994), los anillos formados durante las estaciones cortas o secas son más delgados que aquéllos formados cuando las condiciones de crecimiento son más favorables. También, los anillos formados en las condiciones sombrías son

normalmente más delgados que aquéllos formados por las mismas especies en las condiciones soleadas.

Se cree que la edad de un árbol puede determinarse contando estos anillos. Sin embargo, esto puede llevar a errores porque las condiciones medioambientales anormales pueden causar que un árbol produzca múltiples anillos de incremento o impedir el crecimiento completamente en un cierto tiempo.

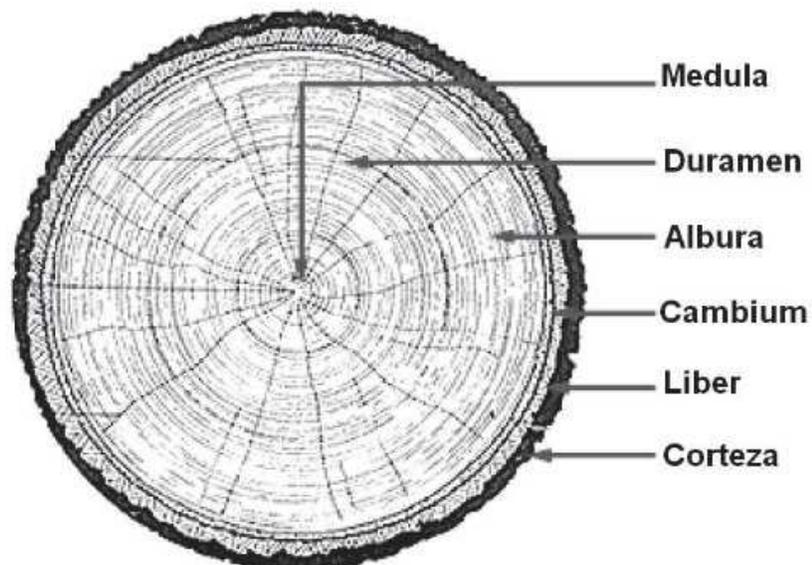


Figura 19: Elementos del Tronco de madera de balsa
Fuente: (Acuña y Casado,2005).

En la parte inferior del tronco se encuentran las raíces, mantienen una forma tablar grandes. Posee una copa amplia y redondeada, de gran tamaño con hojas simples, alternas, pentalobuladas, grandes, su fruto ésta formando una cápsula dehiscente, las semillas pequeñas, negras se encuentran rodeadas por una lana como se puede apreciar en la figura 20.



Figura 20: Hojas y fruto del árbol de balsa
Fuente: (Rarepalmseeds, 2010)

2.11.4. Corte del árbol de balsa y secado

El proceso de corte del árbol se lo realiza en dos etapas, la primera en la cual se hace una incisión hasta la mitad del diámetro del tronco.

Se procede a dejar 15 días de reposo con el objeto que baje toda la savia elaborada de la parte cortada, posteriormente se procede a cortar la parte faltante del tronco. Se pasa almacenar la parte cortada la cual tiene un alto contenido de agua aproximadamente el 150% de su peso, logrando de esta manera un pre secado al medio ambiente.

Finalmente, se lo lleva a un proceso de secado en hornos hasta obtener el 12% de humedad, a elevadas temperaturas eliminando a su vez hongos, bacterias e insectos que están presentes en su estado primitivo.

2.11.5. Propiedades direccionales de acuerdo al corte

Al ser la madera de balsa considerada como un material aniso trópico, uno de los factores que influyen directamente en la resistencia es la orientación de las fibras y la manera de crecimiento propia del árbol, para lograr el máximo provecho a la misma al momento del corte es importante considerar la forma en que el grano pasa a través del

árbol. La dirección del grano controla realmente la rigidez y flexibilidad del espécimen de balsa. Por tal razón las propiedades varían a lo largo de tres ejes respectivamente perpendiculares, longitudinal, radial y tangencial. Como se aprecia en la figura 21.

- Eje tangencial

Es el eje tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal de la pieza. (Manual de Construcción Viviendas de Madera, 2014)

- Eje radial

El eje radial es perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal. (Manual de Construcción Viviendas de Madera, 2014).

- Eje axial o longitudinal

El eje longitudinal es paralelo a la dirección de las fibras y, por ende, al eje longitudinal del tronco. Forma una perpendicular respecto al plano formado por los ejes tangencial y radial. (Manual de Construcción Viviendas de Madera, 2014).

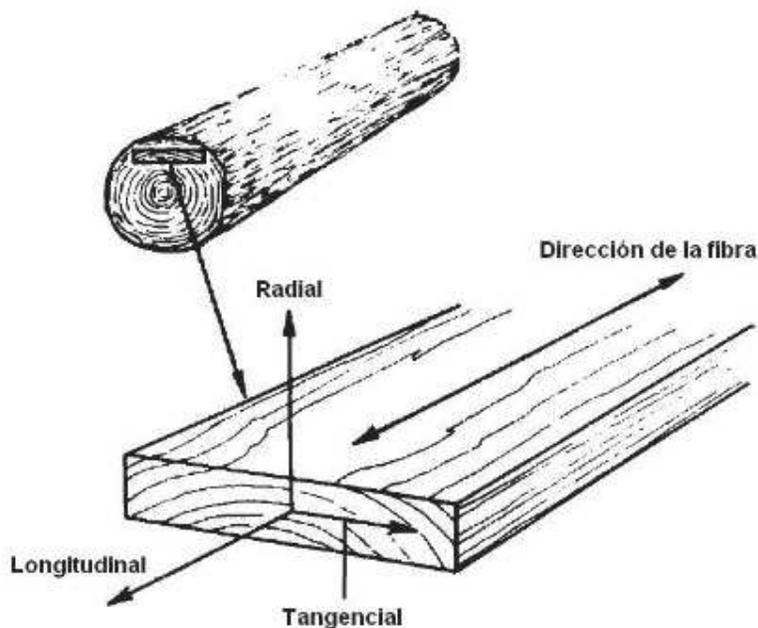


Figura 21: Distribución de los ejes con respecto a la dirección de la fibra y a los anillos de crecimiento.

Fuente: Winandy,1994

Sin embargo, la disposición del corte de las láminas o tablonés tiene un papel fundamental ya que dependiendo del tipo de la sección en cada eje el grano varía proporcionando flexibilidad o rigidez. Dependiendo de la clase de corte se forman tres variedades de grano como se puede apreciar en la figura 22 y 23, cada corte genera un modelo distinto, y cada uno tiene características diferentes.

Una lámina es de grano A, cuando es cortada en la dirección tangente del tronco, para que los anillos anulares del árbol corran a través del espesor de la lámina, las fibras son largas y se las puede visualizar como líneas de grano largo. Es muy flexible a lo largo de la lámina y tiene la capacidad de doblarse alrededor de curvas y deformarse fácilmente.

Por otra parte, si es grano C, se realiza el corte en dirección perpendicular a los anillos de crecimiento quedando paralelos a la superficie de la lámina, ésta será rígida de borde a borde, pero se fractura y divide fácilmente.

Si la dirección del grano se define menos claramente se denomina tipo B, dado un corte aleatorio, la lámina tendrá propiedades intermedias entre los tipos A y C. Las

líneas de grano son más cortas que el tipo A, y más rígido a lo largo de la lámina. El grano B es el más abundante y es adecuado para la mayoría de las aplicaciones por estar en un punto medio entre flexibilidad y rigidez.



Figura 22: Fotografía tipos de Grano (A) (B) Y (C)

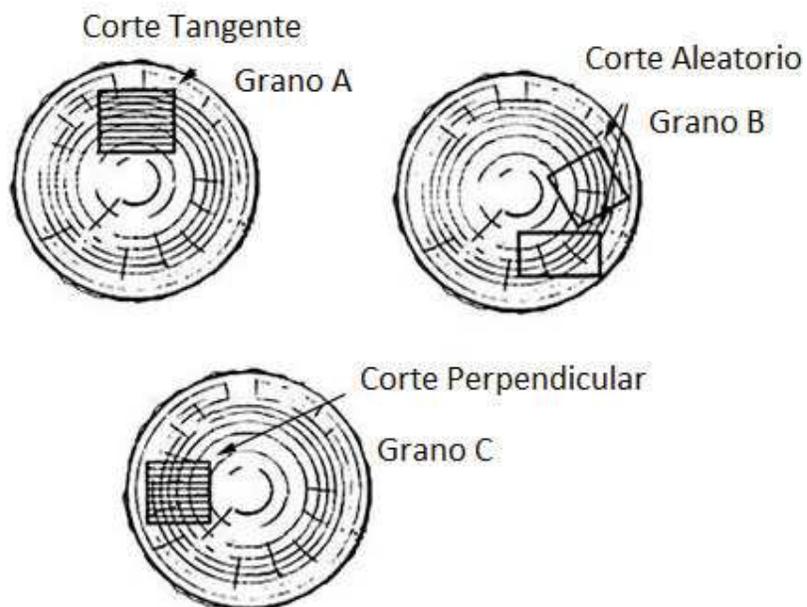


Figura 23: Sección transversal del tronco de madera de balsa en sus diferentes cortes de grano

2.11.6. Composición y Estructura de la Balsa

Balsa, con su baja densidad y propiedades mecánicas relativamente altas, se utiliza frecuentemente como núcleo en paneles estructurales de sándwich, en aplicaciones que van desde palas de turbinas eólicas hasta yates de carreras. El estudio realizado por Borregas, Ahvenainen, Serimaa y Gibson en 2015, exponen la estructura celular de la madera de balsa, se compone de fibras (66-76%), rayos (20-25%) y vasos (3-9%) (figura 24). La gran variación de densidad deriva en gran medida de las fibras, que disminuyen en la longitud del borde de la fibra (panel de abeja) y aumentan el espesor de la pared a medida que aumenta la densidad (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015). En la figura 6 se puede apreciar la estructura de la fibra, célula prismática conocida también como panel de abeja.

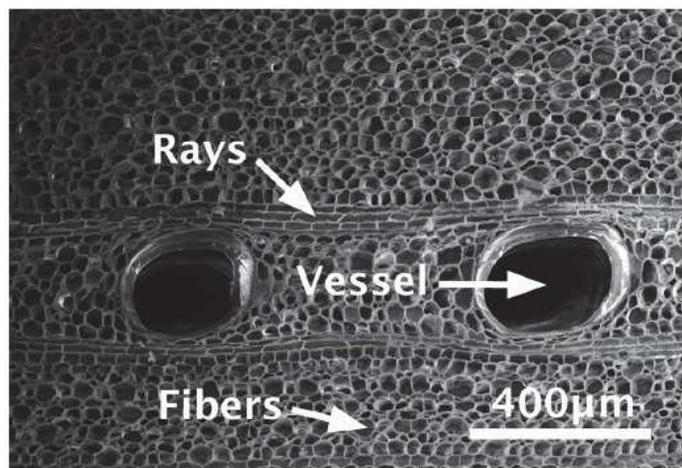


Figura 24: Micrografía de la sección transversal de la madera de balsa indicando los principales tipos de células .

Fuente: (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015).

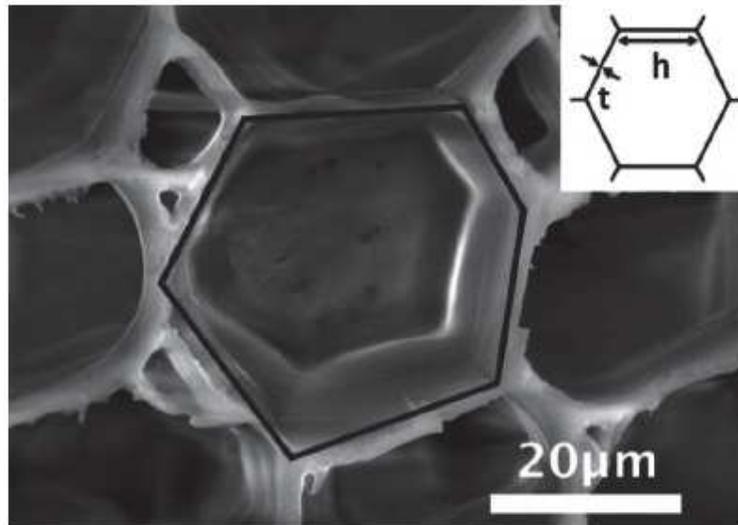


Figura 25: Estructura de la Fibra - Célula Prismática (Panel de Abeja).
Fuente: (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015).

Las fibras de madera de balsa tienen una forma poligonal irregular en sección transversal, a menudo parecida a un hexágono. Por simplicidad, se modela como hexágonos regulares (figura 25). La longitud del lado de celda (h) disminuye al aumentar la densidad de balsa. El grosor de la doble pared celular aumentó casi tres veces desde maderas de baja densidad a alta densidad, desde aproximadamente $0,8$ hasta $2,2 \mu\text{m}$ (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015).

Borregas y otros concluyen que, dado el comportamiento mecánico de la madera depende de la estructura celular y de la pared celular, y es necesario una caracterización estructural más detallada de la balsa para el modelado a escala múltiple y una mejor comprensión de sus propiedades mecánicas, relevantes para su uso como material de núcleo en paneles sándwich, Para el diseño de materiales de ingeniería inspirados en la balsa (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015).

2.11.7. Peso y densidad de la Madera

Dentro de los factores que afectan el peso de la madera de balsa es la densidad, y esta a su vez está estrechamente relacionada con el contenido de humedad. Inicialmente en

estado verde la balsa contiene entre 150% a 200% de humedad en peso, para finalmente alcanzar una humedad de 12% en hornos de secado. La densidad de la madera, varía de un árbol a otro de la misma especie, depende del tiempo y condiciones de crecimiento.

En Ecuador, se producen variedades de balsa, acorde a factores medioambientales de desarrollo, la primera de baja densidad también conocida como liviana, la cual sólo requiere de 4 a 6 años para su corte generalmente es comercializado en el mercado nacional. La segunda posee alta densidad, denominada balsa pesada, cuyo corte es a los 10 años de crecimiento proporcionando propiedades y características necesarias para la exportación.

2.11.8. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas son las características inherentes, que permiten diferenciar un material de otro. En el caso de la madera son su aptitud y capacidad para resistir las fuerzas o licitaciones externas. Por fuerza externa se entiende a cualquier fuerza que tiende a deformarlo de cualquier manera. Son en gran parte tales las características que determinan el uso de la madera para los propósitos estructurales y de la construcción y los usos innumerables de los cuales los muebles, los vehículos, los instrumentos, y las manijas de la herramienta son algunos ejemplos comunes.

Un objeto de esta investigación es encontrar valores de resistencia y rigidez, estos, debido a la compleja estructura de la madera, no pueden tener un valor constante que se repita exactamente en cada ensayo, aunque no se cometa ningún error. Lo más que se puede lograr es encontrar valores medios, determinar un rango de mínimo y máximo, con sus respectivas leyes que rigen la diferenciación. Debido a la gran variabilidad en la resistencia de diferentes especímenes de madera, incluso desde el mismo tronco y pareciendo iguales, es importante eliminar en la medida de lo posible todos los factores extraños que puedan influir en los resultados de los ensayos.

Las propiedades mecánicas de la balsa consideradas para este análisis es la constante de restitución elástica, el modulo elástico longitudinal a flexión de manera estática como dinámica. La orientación de las fibras que componen la madera da lugar a la anisotropía de su estructura, por lo que al definir sus propiedades mecánicas hay que distinguir siempre entre la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra.

2.12. Adquisición de señales

2.12.1. Introducción

Adquirir una señal se denomina al proceso de medir un fenómeno físico como temperatura, presión, sonido, vibración etc., para convertirlo en un fenómeno eléctrico como voltaje, o corriente. La adquisición de señales tiene como finalidad digitalizar la señal medida por un sensor para posteriormente ser analizada y determinar los parámetros involucrados en el fenómeno físico a ser medido. Los elementos implicados en la recepción de señales comienzan como se muestra en la figura 26, con el fenómeno a ser analizado, posteriormente un sensor que convierte el movimiento vibratorio en una señal eléctrica, un acondicionador de señal para eliminar posibles ruidos de la misma, un sistema de adquisición de datos y un ordenador, donde la señal se procesa mediante software de análisis modal.



Figura 26: Esquema de adquisición de datos

2.13. Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta y responde a cierto tipo de entrada del entorno físico. Éste podría ser luz, calor, movimiento, humedad, presión, es decir cualquier fenómeno, y lo convierte en un valor diferente fácil de evaluar que normalmente es una señal eléctrica, tal como voltaje, corriente, resistencia, frecuencia de oscilación para su lectura o procesamiento posterior.

2.13.1. Sensor de Aceleración (Acelerómetro)

Un acelerómetro es un dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de un sistema. La fuerza causada por la oscilación o un cambio de movimiento (aceleración) hace que produzca una carga eléctrica que es proporcional a la fuerza ejercida sobre ella, ésta viene dada por la sensibilidad del acelerómetro. Es decir, convierte la fuerza en una señal eléctrica analógica que indica la aceleración instantánea del objeto medidas en unidades de gravedad (g) en tiempo real.

El principio de funcionamiento se puede entender pensando en él como una masa sobre un sistema de resorte (figura 27). Cuando el sistema es estable y no actúan aceleraciones, la masa estará en el punto de origen. Cuando se aplica una aceleración en el sistema, la masa tendrá un desplazamiento (x) del origen.

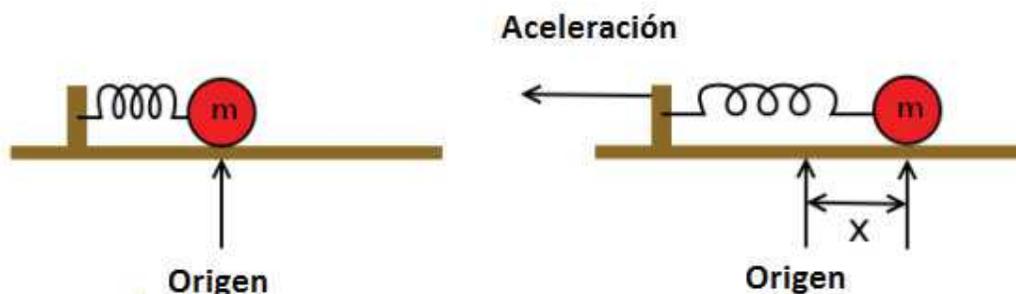


Figura 27: Masa en un modelo de resorte de un acelerómetro de un solo eje

2.13.2. Acelerómetro Capacitivo

Incorporan un pequeño condensador basculante que conecta una masa inercial en una placa fija como su elemento sensor, que es sensible a la deformación de base y aceleración transversal, viene dado por la distancia que separa a dos placas que forman el capacitor. Cuando ocurre una fuerza la masa presiona a la placa variando la distancia entre ellas asignando un valor de voltaje que es proporcional a la aceleración, tal como se muestra en la figura 28.

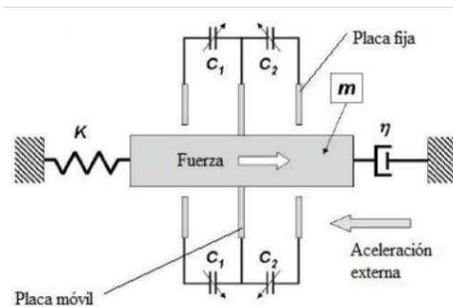


Figura 28: Principio físico del acelerómetro capacitivo
Fuente: (Pérez Miguel Juan, 2011)

2.13.3. Sensor de fin de carrera

Son dispositivos eléctricos cuya finalidad es enviar señales que puedan modificar el estado de un circuito. Se comportan como un interruptor mecánico adoptando dos tipos de posición, ya sea normalmente abierto, o cerrado. Están compuestos por dos partes: Un cuerpo donde se encuentran los contactos y una cabeza que detecta el movimiento como se visualiza en la figura 29.

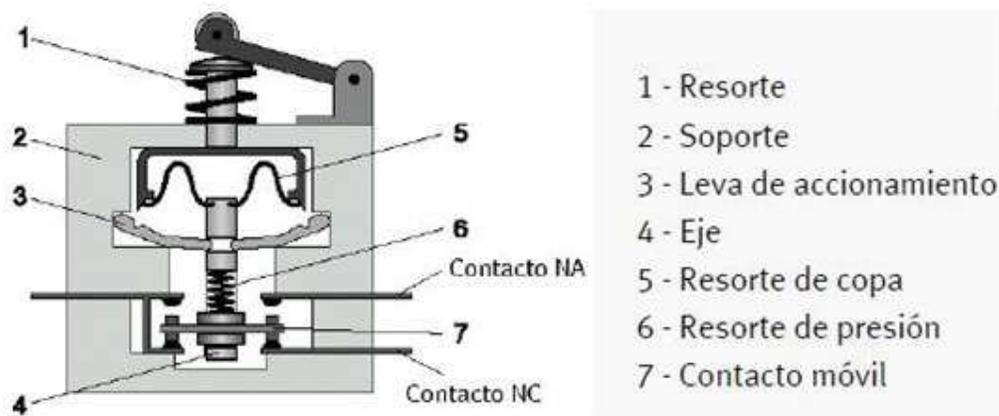


Figura 29: Partes de sensor fin de carrera
Fuente: (Ruiz, Garcia, & Noguera, 2010, p. 06)

2.14. Acondicionamiento de señales

Al momento de adquirir datos de un fenómeno físico por medio de un sensor se puede cometer errores de medición ya sea que la señal censada pueda contener ondas producidas por el medio ambiente, o a su vez existir distorsión en la misma, por tal motivo se tuvo la necesidad de emplear un sistema de acondicionamiento de señal, permitiendo de esta manera transformar la entrada de cualquier naturaleza en una señal de calidad eliminando posibles ruidos ocurridos en la medición.

2.14.1. Filtrado de señal

Una manera de acondicionamiento se puede lograr por medio del filtrado, que se utiliza para aumentar, atenuar ciertas frecuencias teniendo como finalidad la separación de señales, o su restauración. La separación de señal es necesaria cuando ha sido contaminada con interferencia, ruido u otras señales. Por ejemplo, imagine un dispositivo para medir la actividad eléctrica del corazón del bebé mientras todavía está en el útero. La señal cruda probablemente será corrompida por la respiración y los latidos del corazón de la madre. Puede utilizarse un filtro para separar estas señales de modo que puedan analizarse individualmente.

La restauración de señal se utiliza cuando ésta ha sido distorsionada de alguna manera. Por ejemplo, se puede filtrar una grabación de audio para representar mejor el sonido tal como ocurrió realmente. En la actualidad existen diferentes tipos de filtros que se han desarrollado para satisfacer las necesidades de diversas aplicaciones. Entre los más comunes tenemos los limitantes de banda de paso.

2.14.2. Banda de paso

Es el rango de frecuencias sobre el cual pasará una señal entrante. Las frecuencias de señal situadas fuera de la banda de paso están atenuadas. Muchos filtros caen en una de las siguientes categorías de respuesta, en función de la forma general de su banda de paso.

2.14.3. Frecuencia de corte (FC).

Como un filtro real se desplaza gradualmente, normalmente se especifica la frecuencia de corte como la frecuencia en la que la respuesta es $1/2$ (0.707) veces la de la banda de paso, también se conoce como el punto -3 dB.

2.14.4. Tasa de atenuación.

La transición entre la banda de paso y la banda de parada es una función continua y la velocidad a la que se produce esta transición es una métrica común utilizada para seleccionar un filtro. Normalmente se expresa la tasa de atenuación en decibeles por década, donde una década es un factor de 10 en frecuencia.

2.14.5. Filtros de paso bajo

Pasan señales de baja frecuencia mientras bloquean señales de alta frecuencia como se aprecia en la figura 30 a. La banda de paso varía de (0 Hz) hasta llegar a la FC.

2.14.6. Filtros de paso alto

Permiten el paso de señales de alta frecuencia mientras bloquean las señales de baja frecuencia. La banda de paso varía desde una frecuencia de corte (FC) hasta el infinito, como se muestra en la figura 30 b.

2.14.7. Filtros de paso de banda

Tal como se muestra en la figura 30 c, admiten solamente las señales entre dos frecuencias dadas, bloqueando señales más bajas y más altas. La banda de paso se encuentra entre dos frecuencias, FL y FH. Las señales entre DC y FL están bloqueadas, al igual que las señales desde FH hasta el infinito. La banda de paso de estos filtros se caracteriza a menudo como que tiene un ancho de banda que es simétrico alrededor de una frecuencia central.

2.14.8. Filtros de parada de banda

Bloquean las señales que se producen entre dos frecuencias dadas, FL y FH. La banda de paso se divide en un lado bajo (DC a FL) y un lado alto (FH al infinito). Por esta razón, a menudo es más sencillo especificar un filtro de parada de banda por el ancho y la frecuencia central de su banda de parada. Los filtros de parada de banda también se llaman filtros de muesca, especialmente cuando la banda de parada es estrecha (figura 30 d).

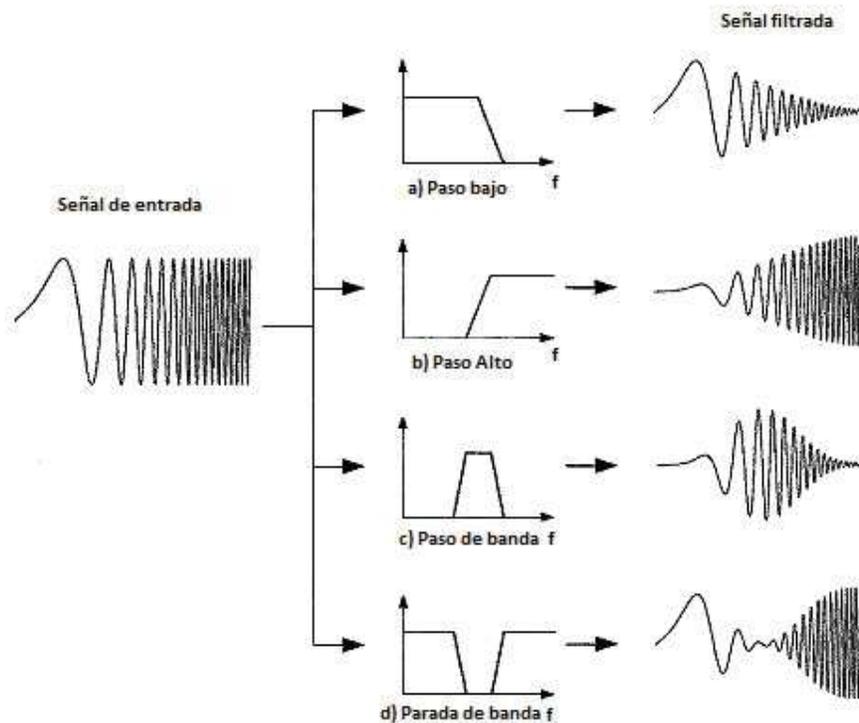


Figura 30: Tipos de filtros para una señal de entrada de frecuencia.

Fuente: (Ruiz, Garcia, & Noguera, 2010, p. 25)

2.15. Adquisición de Datos

2.15.1. Tarjeta de Adquisición de Datos

El hardware de adquisición de datos (DAQ) actúa como la interfaz entre un ordenador y las señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que lee señales de los sensores para posteriormente ser interpretadas por una computadora. (National, 2017)

2.15.2. Hardware DAQ

En este estudio se ha utilizado la tarjeta de National Instruments NI 6009 multifunción con conexión USB (figura 31), una velocidad máxima de muestreo de 48000 muestras/s (S/s), asegurándonos una alta confiabilidad en señales complejas, además de que el módulo tiene compatibilidad con los diferentes sistemas operativos existentes.



Figura 31: DAQ NI-6009
Fuente: (National Instruments, 2017)

2.15.3. Tipos de Señales

La mayoría de las señales de adquisición de datos se pueden describir como analógicas, digitales o de pulso. Mientras que las señales analógicas típicamente varían suavemente y continuamente con el tiempo, las señales digitales están presentes en puntos discretos en el tiempo (Figura 32).

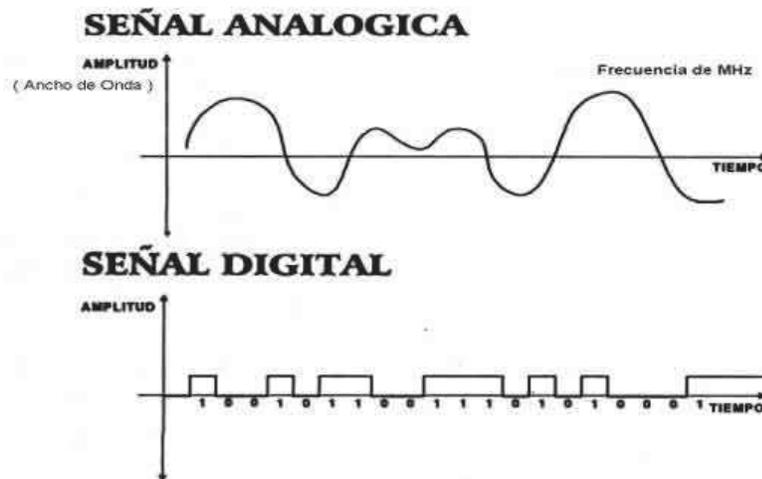


Figura 32: Tipos de Señales con dominio del tiempo
Fuente: (Ruiz, Garcia, & Noguera, 2010, p. 24) .

2.15.4. Conversor Analógico Digital (ADC)

Para adquirir señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por un ordenador. Un ADC es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en un software para adquisición de datos. (National Instruments, 2017)

2.15.5. Resolución del ADC (daq)

Al número de bits ocupados para esquematizar una señal analógica establece la resolución del ADC. Mientras mayor sea la resolución de la tarjeta de adquisición, mayor es el número de fragmentaciones de la señal analógica procesada, por lo tanto, menor será el cambio de valor detectable.

En la figura 33 se puede observar una señal analógica obtenida en un ADC de 3 bit y la misma en uno de 13 bits, en el primer caso divide el rango en 8 partes, siendo estas representadas por un código binario entre 000 y 111 y sus posibles combinaciones para cada división. Para el segundo caso divide la señal en 8192 fragmentos. En el primer

argumento la señal obtenida no simboliza adecuadamente la muestra original, no así para la representación del ADC de 13bits que se obtiene una señal mucho más precisa.

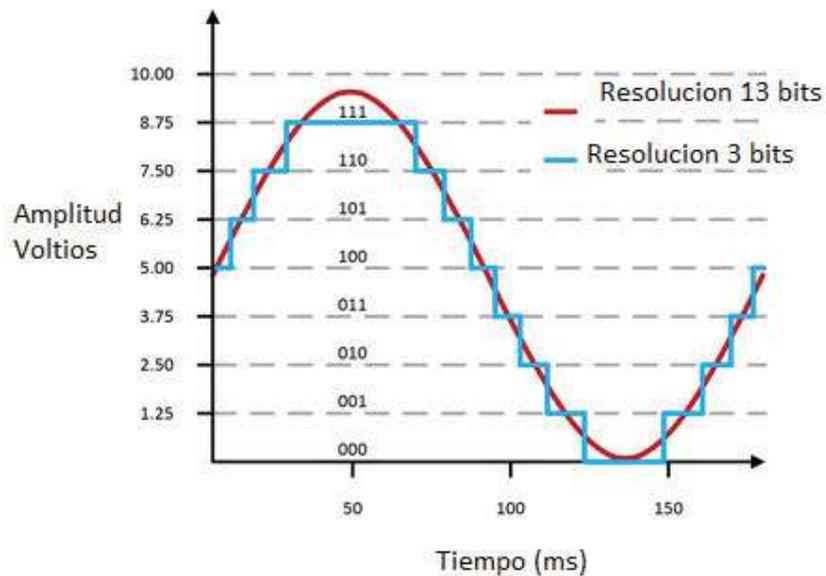


Figura 33: ADC de una señal con resolución 3 y 13 bits
Fuente: (National Instruments, 2017)

El número máximo de partes en las que la señal analizada se puede dividir da la resolución del ADC, éste número de niveles se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$\text{Numerodeniveles} = 2^n \quad (2.7)$$

Donde:

- Resolución representada por el número de niveles
- n: número de bits del ADC.

2.15.6. Frecuencia de muestreo

Al número de muestras tomadas por unidad de tiempo se conoce como frecuencia de muestreo, cuanto mayor sea esta frecuencia mejor será la digitalización. Por ejemplo: si

la frecuencia de muestreo es de 1000 hertzios, durante 3 segundos entonces tomara 1000 muestras por cada segundo, 3000 muestras en total.

2.15.7. Teorema de Nyquist para muestreo

En el proceso de toma de datos es importante determinar con que velocidad se adquiere las muestras por tal razón que se debe recurrir al Teorema de Muestreo de Nyquist el cual establece la relación entre la velocidad de muestreo y la frecuencia de la señal obtenida. Menciona que la velocidad de muestreo f_s debe ser por lo menos el doble o mayor de la unidad de interés siendo esta frecuencia más alta que la señal medida. En la práctica se utiliza 5 veces la frecuencia máxima.

2.16. Software de adquisición de datos

En el desarrollo del presente proyecto de investigación se utilizará un software de adquisición de datos, el cual cuenta con un medio de programación gráfica con funciones propias para el análisis, adquisición de datos y el control de instrumentos. Además, brinda amplia flexibilidad en un potente ambiente de desarrollo y versatilidad en el entorno de control y automatización de procesos.

Capítulo 3

DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Técnicas para la toma de información

3.1.1. Tamaño de la muestra

Se determinará de acuerdo con la norma ASTM D 2915-10, en la cual se especifica la siguiente ecuación para el muestreo y análisis de datos en ensayos de madera:

$$n = \left(\frac{t * s}{\alpha * \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{t * CV}{\alpha} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3.2)$$

Donde:

- n= tamaño de muestra
- CV= coeficiente de variación
- t= constante de estimación acorde al nivel de confianza
- α =Precisión de estimación

3.1.2. Selección de la muestra

Anteriormente se describió los lugares de crecimiento de la madera de balsa en Ecuador, de las cuatro regiones existentes, sólo la región costa y oriente son de explotación, De acuerdo al estudio “Caracterización del Cultivo de Balsa en la Provincia de Los Ríos, Ecuador.” que se detalló en el capítulo anterior. La zona de mayor producción se encuentra la provincia del Guayas. Es por ello que se seleccionarán muestras de dicha provincia, específicamente del cantón Duran.

3.1.3. Propiedades Físicas

Porcentaje de humedad (%)

Se adoptará la metodología A de secado en horno primario, propuesta por la ASTM D-4442-16 para la estimación de contenido de humedad en la madera (CH). La cual establece el porcentaje de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

- CH = Contenido de humedad expresado en porcentaje.
- PH = Peso de la madera en su estado húmedo.
- Ps = Peso de la madera en estado seco.

Para analizar el contenido de humedad en cada probeta de madera de balsa se cortará el tablón en menores dimensiones, cada una se pesará en su estado húmedo, posteriormente se secará al medio ambiente (figura 34 literal a) a continuación pasará a un horno eléctrico (figura 34 literal b) a una temperatura de 103 +/-2 C, por un lapso de 24 horas para el caso de maderas de baja densidad, y 36 horas para las de alta densidad, finalmente para obtener su peso en estado seco (figura 34 literal c).

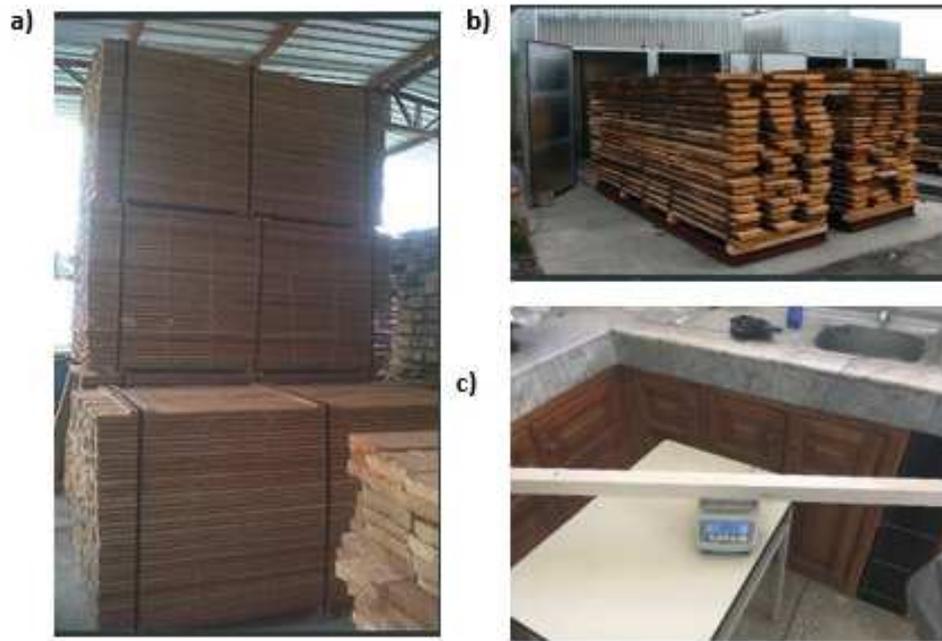


Figura 34: a) Tablones secados al medio ambiente, b) ingreso de los tablones al horno eléctrico, c) Pesado de las probetas con CH 12 %

Determinación de la densidad

Se obtendrá a través de la norma ASTM D 2395-15, la cual proporciona varias metodologías para su determinación, de estos se optará por el procedimiento A, el mismo que consiste en establecer las dimensiones exactas de la probeta considerando cada medida el promedio de tres datos para la misma dimensión tomados en varios puntos obteniendo así el volumen, posteriormente se pesará para hallar su masa.

Finalmente se obtendrá la densidad por la siguiente relación :

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (3.4)$$

Donde:

- ρ : densidad
- m: Masa de la probeta
- V: volumen total

3.1.4. Propiedades Mecánicas

Como menciona (Ilich 2001), en un estudio previo “Dynamic MOE of 55 species using small wood beams”, el módulo elástico estático para flexión en comparación con el módulo elástico dinámico de flexión está altamente relacionado. A su vez, fue demostrado que se puede estimar el Módulo Young estáticamente y compararlo dinámicamente obteniendo una diferencia entre ellos insignificante. Por tal motivo en el presente estudio se desarrollarán ensayos estáticos basados en la norma ASTM D-143-14, adoptando la metodología y requisitos de los ensayos que describe, aplicados para determinar las propiedades mecánicas de las muestras.

Flexión Estática módulo de elasticidad (MOE)

La flexibilidad es la propiedad que tienen algunas maderas de poder ser deformada en su sentido longitudinal, sin que ocurra la fractura. Dentro de ésta tenemos el límite de proporcionalidad que se refiere al lugar geométrico en el cual las tensiones son proporcionales a las deformaciones y está marcado por una ecuación lineal de primer orden. Posteriormente se encuentra el límite elástico denominado así a la zona en que recupera su forma primitiva cuando cesa la fuerza que las ha deformado. A partir del límite plástico la pendiente declina y empieza en la probeta deformaciones permanentes. La madera presenta especial aptitud para sobrepasar su límite de elasticidad por flexión sin que se produzca rotura inmediata.

Según la norma para ensayo a flexión utilizando el método primario, la probeta deberá tener una longitud de 760 mm, colocarse simplemente apoyada sobre su canto con una distancia entre apoyos de 710 mm. Ambos bordes del soporte estarán provistos de placas de rodillos de espesor 50 mm.

El laboratorio de mecánica de materiales, lugar donde se llevará a cabo los ensayos, posee un equipo de ensayos universal. Este cuenta con soportes laterales que evitan la posibilidad de pandeo lateral durante el ensayo. El valor del módulo de elasticidad en flexión estática (MOE), se realizará aplicando una carga en el centro de la luz con una velocidad constante 2.5 mm/min y de tal forma que no se sobrepase el límite elástico.

El ensayo de flexión estática, siguiendo la norma ASTM D 143-14, consiste en medir la deformación que se produce al aplicar una carga vertical sobre el centro del canto

de la pieza, como se muestra en la figura 35 (a), para ello, se utilizará un comparador de reloj cuyas especificaciones se presentan en la tabla 4, el cual toma la medida sobre la fibra neutra de la viga del centro de la longitud de apoyo de la pieza, así se evita la influencia tanto de la zona en tensión como de la zona en compresión (figura 35 (b)), producidas durante la flexión.

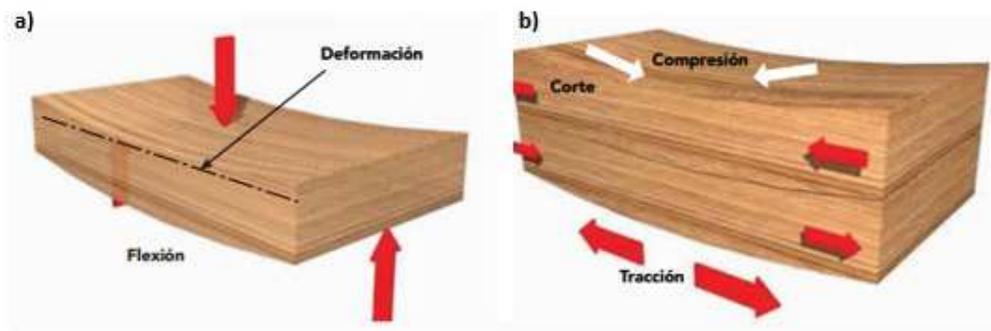


Figura 35: a) Esquema de ensayo a flexión estática, b) Zonas creadas por ensayo a flexión

Fuente: Manual de la construcción viviendas en madera

Tabla 4
Especificaciones técnicas comparador de reloj Mitutoyo

	Denominación	Característica
	Marca	Mitutoyo
	Modelo	Comparador de reloj Analógico
	Nro.	2952 SB
	Valor división de la escala	0.01 (mm)
	Escala	0 – 100
Curso	30 (mm)	

Fuente: (Catálogos Mitutoyo, 2017)

Durante la realización del ensayo, se tomará el incremento de carga en la parte lineal de la curva de fuerza-deformación (figura 36), en Newton y el incremento de deformación correspondiente a ese incremento de carga, en milímetros. Estos valores se ingresarán en la siguiente ecuación para la deformación producida por una carga central:

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I} \quad (3.5)$$

Donde:

- δ : Deformación [mm]
- P: Carga aplicada [N]
- L: Longitud entre apoyos [mm]
- I: Inercia de la sección transversal

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (3.6)$$

- E: Módulo de Elasticidad

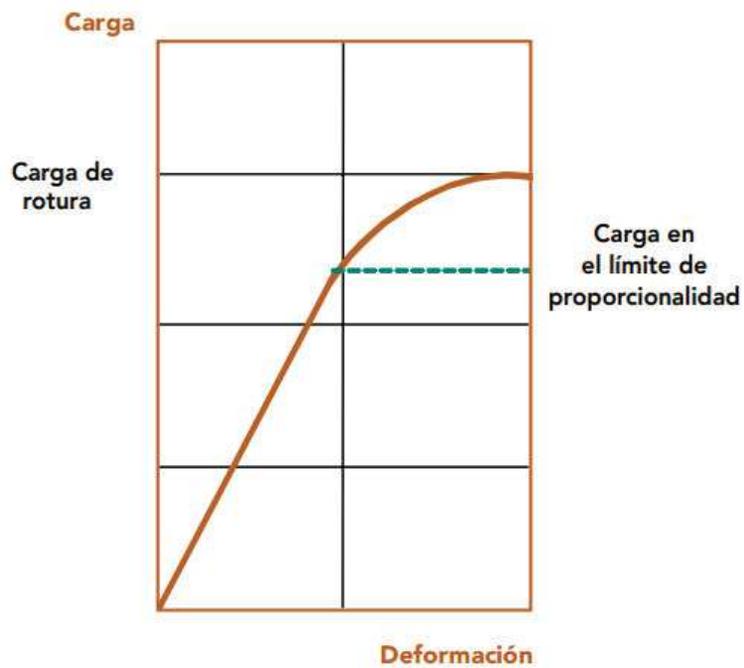


Figura 36: Gráfica Carga – Deformación

Fuente: (Manual de la construcción viviendas en madera, pág. 23,2014).

La fuerza máxima que se aplicará en la madera de balsa para la determinación del módulo de elasticidad bajo flexión, en ningún caso se superó el 40% de la carga última, para ello se realizará un estudio previo inicial de los ensayos según densidades de las probetas. Logrando de esta manera mantener el comportamiento elástico del material y conseguir una excelente precisión en los valores resultantes.

3.2. Instrumentos para la toma de información

3.2.1. Microestructura

Por la complejidad y tamaño de la microestructura de la madera de balsa se utilizará un microscopio electrónico de barrido (SEM) mostrado en la figura 37 que manipula un haz enfocado de electrones de alta energía para generar una variedad de señales en la superficie de muestras sólidas. Las señales que derivan de las interacciones electrón-muestra revelan información sobre la misma incluyendo morfología externa (textura), estructura cristalina y orientación de las fibras que componen la probeta.



Figura 37: Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE-SEM) Marca Tescan modelo MIRA 3 LMU.

3.2.2. Preparación de la muestra

Para el análisis se extraerán de cuatro probetas, 8 muestras distribuidas de la siguiente manera:

- Cuatro especímenes de baja densidad con dimensiones de 3 mm de espesor, 3 mm de ancho y 10 mm de longitud, corte paralelo a las fibras plano longitudinal tangencial para visualización de las traqueidas tal como se muestra en la figura 38.



Figura 38: Especímenes de baja densidad

- Catro especímenes de alta densidad con dimensiones de 3 mm de espesor, 3 mm de ancho y 3 mm de longitud (figura 39), cortadas en el plano tangencial radial para determinar la microestructura de interna (panal de abeja).



Figura 39: Especímenes de baja densidad

3.2.3. Módulo de elasticidad dinámico (MOE)

El análisis dinámico está centrado en la medición de las propiedades mecánicas por medio de un estudio de las respuestas de vibración para un sistema dinámico lineal representado por la combinación de movimientos armónicos simples, mediante una excitación inicial proporcionado por una fuerza de impacto, provocando la tendencia osci-

latoria de la probeta, determinando de esta manera la frecuencia natural, la aceleración con respecto al tiempo, y una combinación de los mismos para obtener un espectro de frecuencias.

En vista de las circunstancias del ensayo este no está normado, pero se ha trabajado con la técnica de vibración en vigas, desarrollando una metodología propia para la realización del mismo. El equipo que se utilizó se muestra en la figura 40, contempla tres sistemas detallados a continuación:

- Sistema de Sujeción (1)
- Sistema de Fuerza (2)
- Sistema de adquisición de datos (3)



Figura 40: Esquema de partes equipo de ensayos bajo régimen dinámico

El ensayo se llevará a cabo haciendo impactar un martillo con una fuerza conocida en la muestra a ensayar. El golpe originará una onda vibratoria que será tomada por un sensor de aceleración colocado a 50 mm del borde izquierdo de la probeta. Los ensayos se realizarán a temperatura ambiente, y condiciones de humedad conocidas.

3.2.4. Sistema de Sujeción

Se encuentra formando el sistema de empotramiento de la probeta, está compuesto por la parte estructural mostrada en la figura 41 parte a, una prensa en c caras planas de 150 mm de longitud de abertura (figura 41 Parte b), pernos de ajuste a la bancada ver figura 41 parte c.



Figura 41: Esquema de partes del sistema de sujeción.

3.2.5. Sistema de Fuerza

Es la parte que proporciona el impulso inicial, está compuesta por un mango superior con un eje que hace las veces de un martillo como se ilustra en la figura 42 literal a, una mariposa de sujeción que tiene la función de regular la altura de impacto (figura 42 literal b), el sistema estructural cuyo cargo es la de soporte del mecanismo de fuerza como se puede apreciar en la figura 42 parte c, por último, una celda de carga miniatura en forma de botón que determina la fuerza de impacto cuyas características se muestran en la tabla 4.



Figura 42: Partes del sistema de Fuerza.

Tabla 5
Especificaciones técnicas de la celda de carga

Especificaciones		Esquema
Canales	1	Vista superior
Temperatura compensada	Min: 60 °C Max: 160 °C	
Excitación	Min: 1 Vdc Max: 18 Vdc	
Histéresis	Min: -0.15% de R. O Max: 0.15% de R.O	
Resistencia de entrada	700 Ohms nominal	
Resistencia de aislamiento	500 MOhms @ 50 Vdc	
No linealidad	Min: -0.15% de R. O Max: 0.15% de R.O	
No repetibilidad	Min: -0.05% de R. O Max: 0.05% de R.O	
Temperatura en operación	Min: -60°C, Max: 200 °C	
Resistencia de salida	700 Ohms nominal	
Sobrecarga segura	150% de R.O.	
Balance cero	Min: -3% de R. O Max: 3% de R.O	
Capacidad	1000lbs	
Salida	2 mV/V nominal	
Excitación calibrada a	10 Vdc	
Altura	0.39"	
Diámetro	1.23"	
Conexión	Cable calibre 26 AWG de 4 hilos con protección de teflón.	

3.2.6. Sistema de Adquisición de datos

A continuación, en la figura 43 se detalla el sistema utilizado para la adquisición de datos, describiendo la técnica para la toma de los mismos en el presente proyecto de investigación:

- Sensor de Aceleración (a)
- Sensor de posición (b)
- Visor de fuerza (c)
- Sistema de acoplamiento de señales a la DAQ (d)
- Software de adquisición de datos (e)



Figura 43: Componentes del sistema de adquisición de datos

3.2.7. Parámetros técnicos del equipo analizador de vibraciones

Para el desarrollo del ensayo por vibraciones es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros iniciales:

- Fuerza de impacto: 2 [N]
- Separación de la celda de carga a la probeta: 10 [mm]

- Altura máxima alcanzada por el martillo: 150[mm]
- Impulso inicial: Nulo solo desciende por gravedad
- Tiempo de ensayo: 4 [s]

3.2.8. Selección del Sensor de Aceleración

En vista de que la fuerza de impacto es muy pequeña, la amplitud de oscilación será baja, por lo tanto, la frecuencia de vibración será mínima.

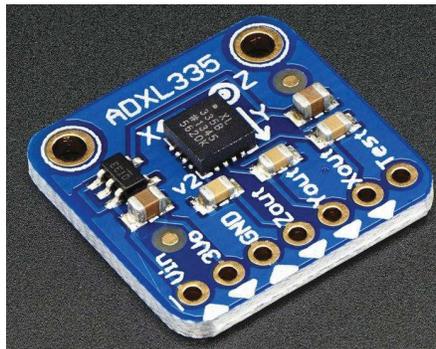


Figura 44: Esquema del acelerómetro ADXL 335
Fuente: (Analog Devices, 2017)

Es por ello que se eligió el acelerómetro análogo adxl335 (figura 44) que tiene las siguientes características:

3.2.9. Voltaje de Operación

Este dispositivo tiene versatilidad para aceptar voltajes de funcionamiento de 1.8V a 3.6V considerando que es necesario colocar un capacitor al ingreso de la alimentación para disminuir el ruido de la fuente de alimentación, cuyo valor aceptable del capacitor es de 0.1 μ F. Este tipo de sensor tiene la ventaja de poseer una salida radiométrica, es decir que la tensión de salida del mismo es proporcional a la aceleración “G” por lo que tendremos el valor de salida para 0g la mitad del voltaje de alimentación.

3.2.10. Ancho de banda

Dada la necesidad para los ensayos de una velocidad de muestreo alta se ve en la necesidad de acondicionar el ancho de banda para los tres ejes censados, ejes X, Y, Z. Colocando en cada salida un capacitor acorde a la tabla 5, esto permite obtener el ancho de banda deseado, reducir el aliasing y el ruido de la señal. El ancho de banda nos establece el valor de respuesta mínima que pueda detectar el acelerómetro.

Tabla 5

Valores de Capacitores tanto en X, Y, Z acorde al ancho de banda deseado

Ancho de banda	Capacitor μF
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

Fuente: (Datasheet Adxl 335, 2017).

3.2.11. Sensibilidad y Característica estática del Acelerómetro

Como este dispositivo permite el correcto funcionamiento para tensiones entre 1.8 V a 3.6 V, se alimentará con 3V, cuya salida para este voltaje de operación presenta sensibilidad aproximada a 300 mV / g, ya que varía proporcionalmente al voltaje de alimentación. Para poder determinar el comportamiento del acelerómetro en funcionamiento, y establecer la aceleración real acorde a unidades de gravedad (g), es necesario encontrar la forma de relacionar la tensión de salida con el valor de la aceleración, para lo cual se tomarán valores en las posiciones conocidas del mismo como se muestra en la figura 45.

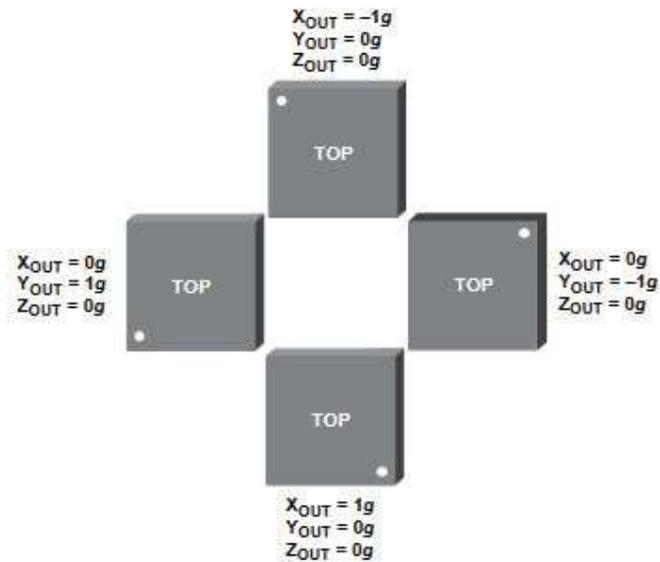


Figura 45: Respuesta de salida y orientación a la gravedad
Fuente: Datos técnicos ADXL 335 (Datasheet).

De esto se pudo establecer los siguientes valores mostrados en la tabla 6, acorde a las posiciones de la figura 45, a su vez la salida del sensor es proporcional obteniendo una tendencia lineal, seguidamente se calculó la ecuación que rige la aceleración para cada eje tal como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7
Tensión de salida para posiciones conocidas ADXL 335

Valor (g)	Voltaje (V)		
	Eje X	Eje Y	Eje Z
1	1.77	1.84	1.80
0	1.47	1.53	1.50
-1	1.18	1.23	1.19

Tabla 8
Ecuación característica Acelerómetro ADXL 335

Eje	Ecuación Característica
X	$Y = 3,333X - 4,9$
Y	$Y = 3,333X - 5,1$
Z	$Y = 3,333X - 5,0$
Donde Y(g), X(V)	

3.2.12. Selección del Sensor de Posición

En relación a que en el proceso de muestreo se menciona altas frecuencias de adquisición de datos, se vio la necesidad de colocar un sensor de fin de carrera (figura 46), tensión de operación mínima 5 V, 850 mA. Cuya finalidad es tomar el mismo intervalo de tiempo inicial del fenómeno de vibración.



Figura 46: Sensor fin de carrera
Fuente: (Alleen Brandey, 2017)

3.2.13. Medidor de Fuerza

En el sistema de impulso se describió la utilización de un transductor de compresión (celda de carga), el cual consta de un sistema de visualización de fuerza aplicada a la mencionada mostrado en la figura 47, posee una resolución de 0.01 N, voltaje de alimentación de 6 V DC.



Figura 47: Medidor de fuerza celda de carga

3.2.14. Sistema de acoplamiento de señales a la DAQ

Existen dos tipos de señales proporcionadas por el equipo de análisis dinámico, la primera obtenida por el sensor de fin de carrera la cual es de tipo digital, mientras que la segunda determinada por el sensor de aceleración es analógica.

En vista de la naturaleza de las señales se ha optado por la utilización de la tarjeta de adquisición de datos multifuncional NI USB 6009, la cual está compuesta por dos grupos de borneras, en la parte lateral izquierda para entradas/ salidas analógicas como se muestra en la figura 48-a, y en el costado derecho para señales digitales (figura 48-b).

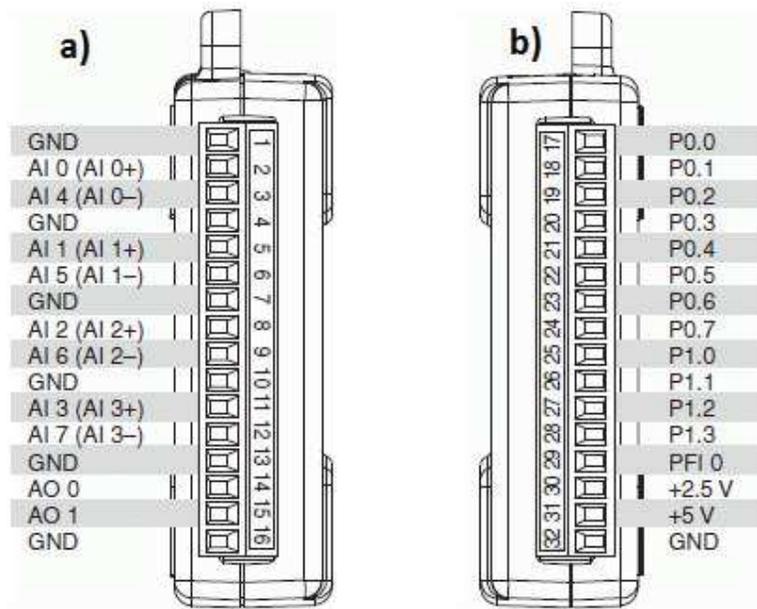


Figura 48: Disposición de pines DAQ NI 6009
Fuente: (National Instruments, 2017)

Sin embargo, como se describió en el anterior capítulo las señales proporcionadas por el acelerómetro requieren de un circuito de acoplamiento de las mismas para obtener de esta manera la máxima resolución y ancho de banda para cada eje de análisis, así mismo la entrada digital a la DAQ para evitar posibles daños por exceso de corriente.

3.2.15. Circuito de Acoplamiento de señales

La tarjeta de acoplamiento de señales está constituida de un circuito impreso PCB, se alimenta con 5 voltios que ingresan desde la DAQ, se regulan mediante el transformador 7803 para suministrar el voltaje de operación al acelerómetro, está formado por condensadores electrolíticos para la parte analógica, una resistencia para la parte digital. A continuación, en la figura 49 se visualiza el circuito electrónico que conforma el módulo de acoplamiento de señales.

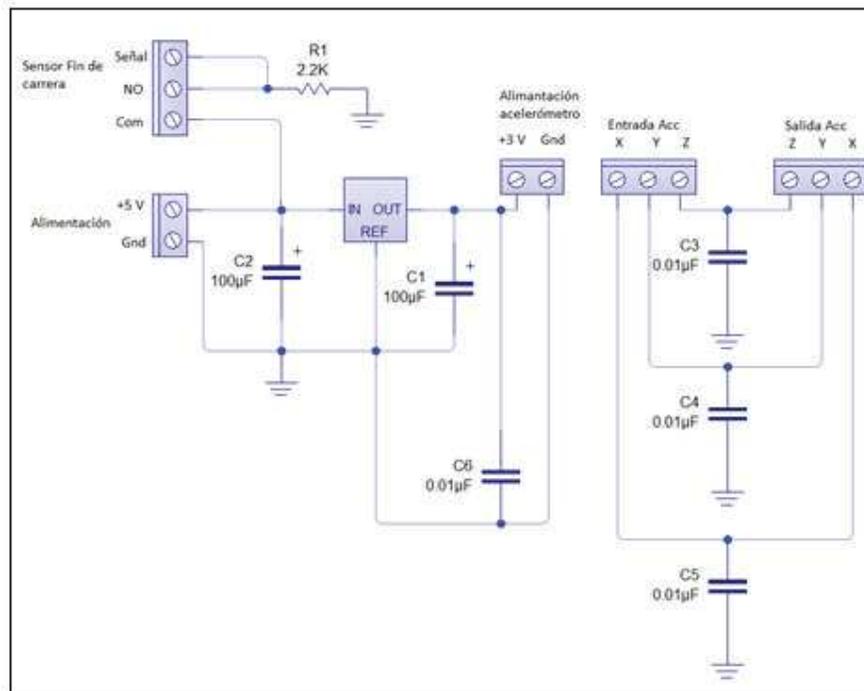


Figura 49: Circuito de acoplamiento de señales para la DAQ

En la figura 50 se presenta un esquema de conexión de cada componente, a la tarjeta de acondicionamiento de señales, y esta a su vez a la DAQ procurando de esta manera adquirir señales en forma analógica y digital de manera simultánea.

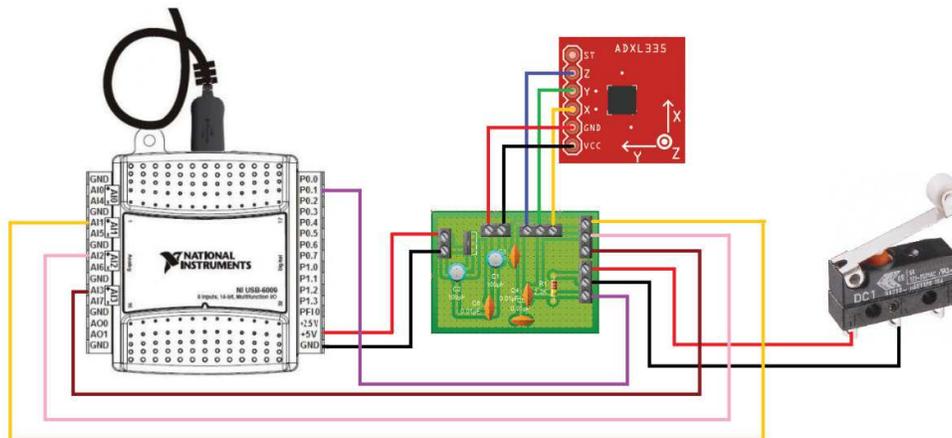


Figura 50: Esquema de conexiones sistema de adquisición de datos

3.2.16. Software de Adquisición de datos

El software de adquisición de datos que se diseñó para la presente tesis se muestra en la figura 51. Está formado por dos pantallas, el panel Frontal y Diagrama de bloques (figura 52); el primero constituido por la interfaz de conexión al usuario en el que se puede observar los instrumentos virtuales. La ventana de bloques o diagrama de bloques es el lugar donde el programador estructura las diferentes funciones de los instrumentos los cuales se visualizarán en el panel frontal, a su vez es aquí donde se configura la secuencia de los procesos para la adquisición de señales. La pantalla principal en el panel frontal está estructurada por los siguientes módulos:

Módulo de mando

- Panel de Control

Módulo de Información

- Descripción del programa
- Instrucciones de uso

Módulo de desarrollo

- Parámetros de configuración
- Graficas de Aceleración vs tiempo real
- Análisis Espectral



Figura 51: Programa para adquisición de datos

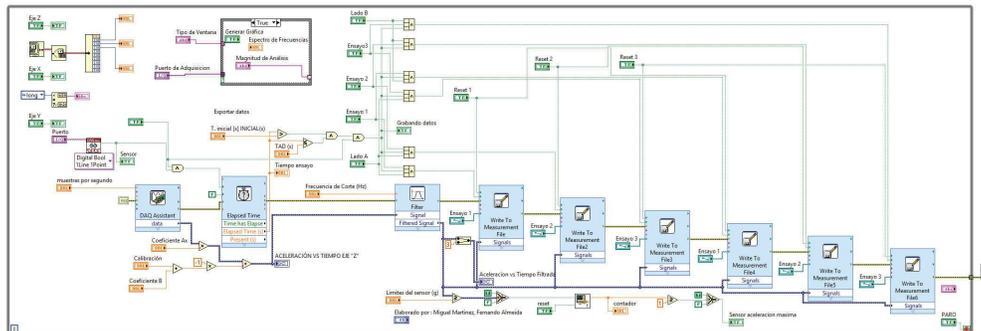


Figura 52: Diagrama de bloques SAD

Módulo de mando

Se encuentra formando el panel de control con los botones de selección como se puede observar en la figura 53, en donde elegiremos el tipo de ensayo, además de visualizar el tiempo transcurrido en el mismo, cuenta con luces piloto para cada acción de ejecución.



Figura 53: Esquema del módulo de mando SAD

Módulo de Información

Presenta una breve descripción del equipo, del software de análisis y adquisición de datos, su alcance, el tipo de estudio a desarrollar, además de las Instrucciones de uso asegurando su correcta utilización, y calibración del mismo.

Módulo de desarrollo

Está constituido por los parámetros de configuración del sistema de adquisición de datos como se observa en la figura 54. El diseño del programa se basa en que transcurrido cierto tiempo (TAD) configurado por el usuario se apague automáticamente la toma de señales. Es posible establecer el eje de análisis ya sean los tres simultáneamente (ejes X, Y, Z) o cada uno por separado.

ACERCA DE PARAMETROS Aceleracion Vs tiempo Real Aceleracion Vs tiempo filtrada Analisis Espectral Instrucciones

Acelerómetro Analógico ADXL335

Límites del sensor (g) Puerto de Adquisición

SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

muestras por segundo

Eje de Analisis

Eje X Eje Y Eje Z

Magnitud de Análisis Tipo de Ventana

ESPECTRO DE FRECUENCIAS

Tiempo de adquisición de datos T. inicial [s] TAD (s)

FILTRADO DE SEÑAL

Tipo de filtro Frecuencia de Corte (Hz)

EXPORTACION DE ARCHIVOS

Lado A

Ensayo 1	<input type="text" value="ensayo1.lvm"/>
Ensayo 2	<input type="text" value="ensayo2.lvm"/>
Ensayo 3	<input type="text" value="ensayo3.lvm"/>

Lado B

Ensayo 1	<input type="text" value="ensayo1B.lvm"/>
Ensayo 2	<input type="text" value="ensayo2B.lvm"/>
Ensayo 3	<input type="text" value="ensayo3B.lvm"/>

Característica Estática Acelerómetro

Forma: $A \cdot x + B \cdot C$

Coefficiente Ax Coeficiente B

Offset de calibración

Calibración

Sensor de Posición

Puerto

Figura 54: Parámetros de configuración

Gráficas de Aceleración vs tiempo real

Presenta un esquema de la aceleración en el eje analizado con respecto al tiempo de ejecución del ensayo, está formado de un osciloscopio virtual (figura 55) en el cual podremos visualizar las señales analógicas que entrega el acelerómetro para cada posición deseada.

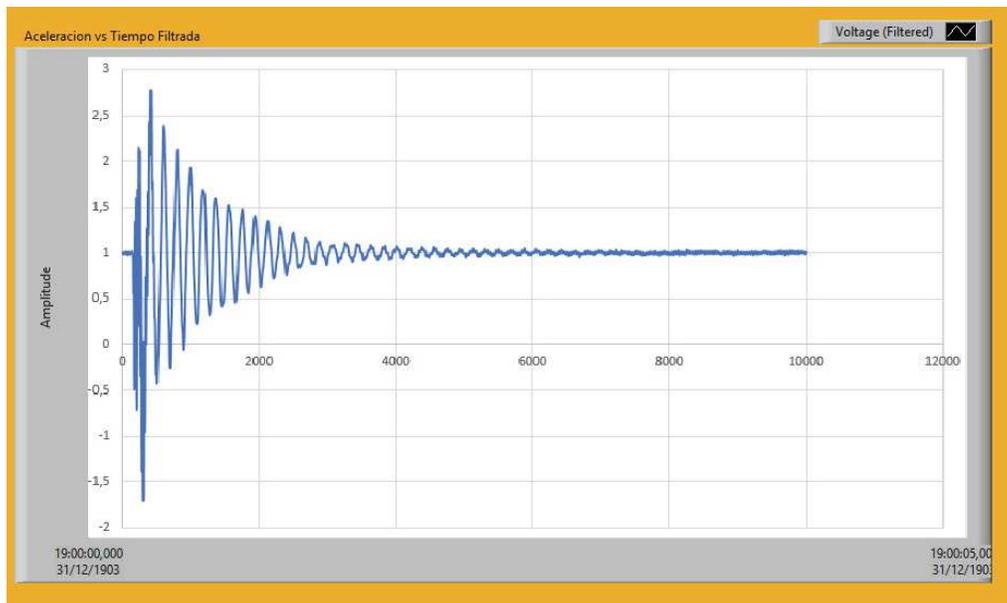


Figura 55: Ejemplo de gráfica aceleración vs tiempo

Análisis Espectral

En el análisis de la FFT se puede apreciar los espectros de frecuencia para la visualización de estos se utilizó un osciloscopio virtual (figura 56) en el cual podremos representar las señales de cada espectro para cada eje correspondiente.

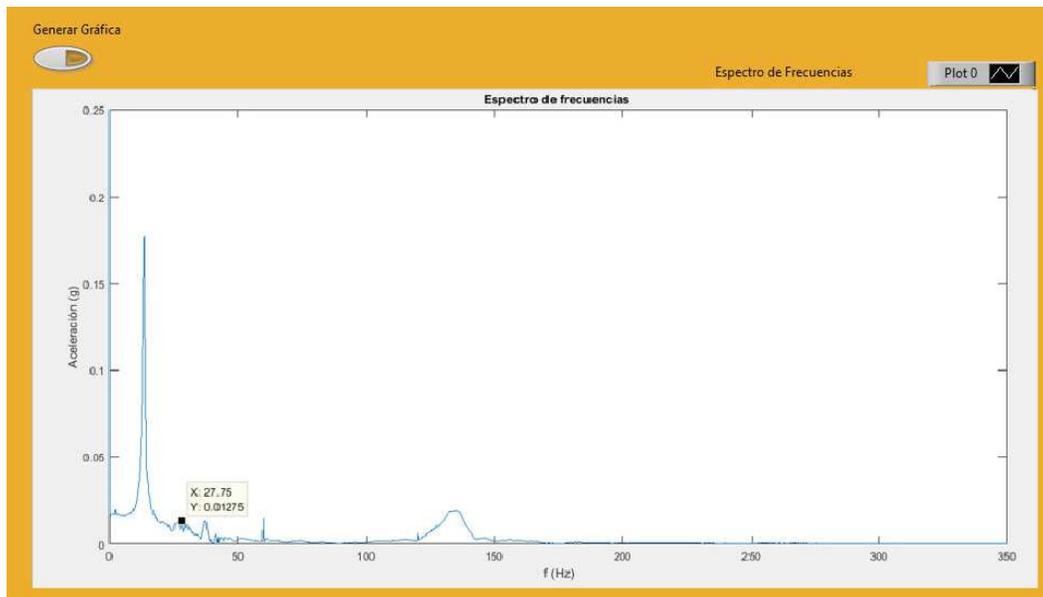


Figura 56: Ejemplo de análisis espectral del SAQ

Capítulo 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se estudian y exponen los resultados obtenidos de cada ensayo recalando los aspectos más notables resultantes de la investigación realizada.

4.1. Estimación del tamaño de muestra

Se obtuvo de acuerdo con la norma ASTM D 2915-10, considerando una confiabilidad del 99 %, es decir un error del 0.01 (α), para esto se determinó el valor de t acorde a la tabla 8 (estipulado en la norma). Se realizó un estudio previo de diez probetas para hallar una media y una desviación estándar como sigue a continuación en la tabla 9:

Tabla 8
Parámetros de tamaños para muestras acorde al nivel de confianza

df $n - 1$	$CI = 75 \%$	$CI = 95 \%$	$CI = 99 \%$
1	2.414	12.706	63.657
2	1.604	4.303	9.925
3	1.423	3.182	5.841
4	1.344	2.776	4.604
5	1.301	2.571	4.032
6	1.273	2.447	3.707
7	1.254	2.365	3.499
8	1.240	2.306	3.355
9	1.230	2.262	3.250
10	1.221	2.228	3.189
11	1.214	2.201	3.106
12	1.209	2.179	3.055
13	1.204	2.160	3.012
14	1.200	2.145	2.977
15	1.197	2.131	2.947
16	1.194	2.120	2.921
17	1.191	2.110	2.898
18	1.189	2.101	2.878
19	1.187	2.093	2.861
20	1.185	2.086	2.845
40	1.167	2.021	2.704
60	1.162	2.000	2.660
120	1.156	1.980	2.617
∞	1.150	1.960	2.576

Fuente: (Norma ASTM D2915, Pág. 3)

Tabla 9
Estudio preliminar de diez probetas

Nro. de probeta	Frecuencia Obtenida [Hz]
1	25,4
2	25,8
3	25,9
4	26,1
5	26,2
6	26,55
7	26,8
8	26,9
9	27,08
10	27,1
s	0,83
x	26,383

Una vez obtenidos los parámetros necesarios se procedió a utilizar la ecuación regida

en la norma ASTM D 2915-10 para determinar el tamaño de muestra:

$$n = \left(\frac{t * s}{\alpha * \bar{X}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Donde:

- n= Tamaño de muestra
- s= Desviación estándar preliminar
- t= Constante de estimación acorde al nivel de confianza (t=2.6)
- α =Precisión de estimación
- \bar{X} = Valor de la media preliminar

$$n = \left(\frac{2,6 * 0,383}{0,01 * 26,384} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$n = \left(\frac{1,019}{0,264} \right)^2 = 14,91 \quad (4.3)$$

$$n \equiv 15 \quad (4.4)$$

Obteniendo un aproximado de 15 muestras, sin embargo, la norma de ensayos en madera menciona que de existir alguna variación significativa en el valor del ensayo éste se eliminará, por tal motivo el tamaño de muestra se aproximó a 20, tanto para baja densidad como para alta densidad teniendo un total de 40 muestras para el presente análisis.

4.2. Selección de la muestra

Se ha seleccionado especímenes de la provincia del Guayas, específicamente del cantón Duran, se extrajeron diez árboles al azar, de los que cinco eran de baja densidad y cinco de alta densidad. Se obtuvo un tablón de cada árbol con un corte aleatorio y un grano de tipo B, con una sección transversal cuadrada de 200 mm de lado y 1200 mm de longitud, de los cuales se consiguió el material para la elaboración de las probetas.

4.3. Determinación de Humedad

Se analizó el contenido de humedad en probetas de dimensiones 50 mm x 50 mm x 1200 mm (en estado anhidrido), cada una se pesó en una balanza electrónica con una apreciación de una centésima de gramo, en su estado húmedo (tabla 10), posteriormente en su estado seco (tabla 10). Como menciona la metodología A de la norma ASTM D-4442-16 para la estimación de contenido de humedad en madera. Establece el porcentaje de humedad mediante la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100\% \quad (4.5)$$

Donde:

- CH = Contenido de humedad expresado en porcentaje.
- PH = Peso de la madera en su estado húmedo.
- Ps = Peso de la madera en estado seco.

A continuación, se detallan en la tabla 10, los valores de contenido de humedad en cada probeta:

Tabla 10
Estimación del CH% en cada probeta

CH de acuerdo a la estimación del peso en cada estado			
Nro.	Peso Seco (g)	Peso Húmedo (g)	CH%
Probeta 1	443,61	497,24	12,09
Probeta 2	464,17	520,33	12,1
Probeta 3	428,34	480,25	12,12
Probeta 4	454,59	509,32	12,04
Probeta 5	458,09	513,52	12,1

Continua...

CH de acuerdo a la estimación del peso en cada estado			
Nro.	Peso Seco (g)	Peso Húmedo (g)	CH%
Probeta 6	486,51	545,38	12,1
Probeta 7	391,7	439,06	12,09
Probeta 8	519,98	582,53	12,03
Probeta 9	633,38	710,15	12,12
Probeta 10	524,42	587,72	12,07
Probeta 11	537,16	602,26	12,12
Probeta 12	786,28	881,66	12,13
Probeta 13	659,49	739,16	12,08
Probeta 14	772,82	865,71	12,02
Probeta 15	559,21	626,54	12,04
Probeta 16	768,55	861,47	12,09
Probeta 17	816,72	915,95	12,15
Probeta 18	678,96	761,18	12,11
Probeta 19	814,03	912,53	12,1
Probeta 20	710,65	796,28	12,05
Probeta 21	885,5	992,47	12,08
Probeta 22	816,53	914,51	12
Probeta 23	806,84	904,06	12,05
Probeta 24	896,81	1004,97	12,06
Probeta 25	856,12	959,97	12,13
Probeta 26	757,12	848,73	12,1
Probeta 27	865,24	969,67	12,07
Probeta 28	772,11	865,77	12,13
Probeta 29	800,8	897,70	12,1
Probeta 30	812,27	910,47	12,09
Probeta 31	460,87	516,40	12,05
Probeta 32	442,62	496,35	12,14
Probeta 33	464,6	520,96	12,13
Probeta 34	574,75	644,06	12,06
Probeta 35	596,45	668,68	12,11
Probeta 36	440,18	493,35	12,08
Probeta 37	492,88	552,62	12,12
Probeta 38	579,4	649,33	12,07
Probeta 39	409,2	458,39	12,02
Probeta 40	456,68	511,62	12,03

Como se pudo apreciar el contenido de humedad en cada probeta de madera de balsa es aproximadamente del 12%, mostrando distribución ligeramente sesgada a la izquierda (figura 57), con una media de 12.08%, una desviación estándar de 0.03734. Observando los valores predominantes para 13 probetas significando el 32,5%, cuyo contenido de humedad está entre 12.075% a 12,105%, seguido de 10 probetas representando el 25% que varía su CH entre 12,105% a 12,135%.

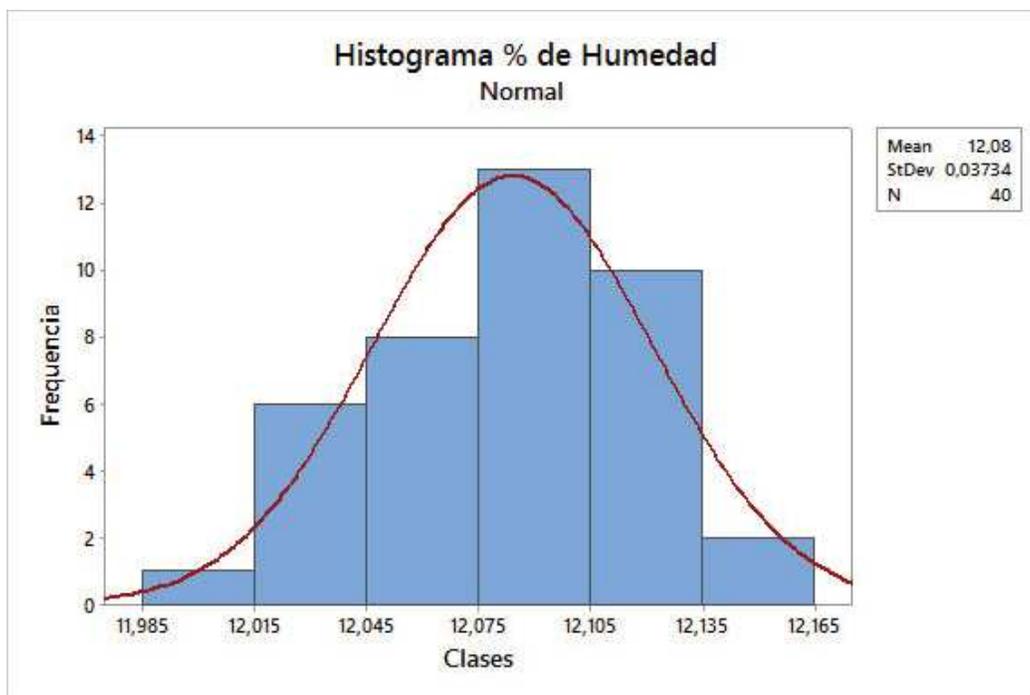


Figura 57: Histograma de frecuencias contenido de humedad

4.4. Densidad

Se obtuvo a través de la norma ASTM D 2395-15, según metodología A, el mismo que consiste en establecer las dimensiones exactas de la probeta como se puede observar en la tabla 11 considerando cada medida el promedio de tres datos tomados al inicio, el medio, al final de cada dimensión.

Tabla 11
Dimensiones sección transversal, longitudinal

Dimensiones sección transversal, longitudinal									
Descripción	Sección Transversal						Longitud		
	Lado A (mm)			Lado B (mm)			(cm)		
Núm. ensayo	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Probeta 1	51	51,05	51	51	51	51,05	120	120	120
Probeta 2	50,5	50,5	50,55	50,5	50,4	50,35	120	119,95	119,98
Probeta 3	50,95	50,8	50,8	50,95	50,85	50,85	118,6	119	118,8
Probeta 4	51,75	51,8	51,75	51,85	52	51,95	120	120	120
Probeta 5	51	50,9	50,75	50,85	50,85	50,65	120	120	120
Probeta 6	51,85	51,65	51,75	51,75	51,75	51,7	119,85	120	120,3

Continua...

Descripción	Sección Transversal						Longitud		
	Lado A (mm)			Lado B (mm)			(cm)		
Probeta 7	51,9	51,9	51,9	51,9	51,8	51,9	120	120	120
Probeta 8	51,8	51,75	51,75	51,8	51,8	51,8	120	120	120
Probeta 9	50,35	50,5	50,65	50,25	50,25	50,5	120	120	120
Probeta 10	51,15	51	51,05	51	50,95	51	120	120	120
Probeta 11	51	51	50,95	51	50,9	50,95	120,06	120	120,02
Probeta 12	50,6	50,65	50,6	50,3	50,3	50,35	119,95	120	119,98
Probeta 13	50,8	50,55	50,4	50,45	50,5	50,45	119,99	119,98	119,96
Probeta 14	50,65	50,55	50,5	50,9	50,85	50,6	120	120	120
Probeta 15	51	51,1	51,1	50,85	50,7	50,95	119,98	119,98	119,97
Probeta 16	50,5	50,55	50,5	50,4	50,4	50,6	119,97	119,98	119,98
Probeta 17	50,5	50,25	50,2	50,4	50,35	50,35	119,95	119,95	119,95
Probeta 18	50,5	50,35	50,25	50,3	50,1	50,35	119,92	119,98	119,95
Probeta 19	50,5	50,5	50,45	50,55	50,6	50,55	119,92	119,93	119,93
Probeta 20	49,5	49,55	49,65	49,75	49,85	49,75	119,94	119,95	119,96
Probeta 21	49,5	49,55	49,85	49,75	49,75	49,7	119,98	119,98	119,97
Probeta 22	49,9	50	50,05	49,9	49,85	49,9	119,97	119,98	119,98
Probeta 23	50	49,8	49,7	49,65	49,6	49,6	119,98	119,97	119,98
Probeta 24	50	50	49,9	49,85	50	50,05	120,02	120	119,98
Probeta 25	49,8	49,9	50	49,4	49,55	49,6	119,92	119,93	119,93
Probeta 26	49,5	49,45	49,5	49,6	49,7	49,55	119,9	119,95	120
Probeta 27	49,7	49,75	49,65	49,75	49,75	49,65	120,02	119,98	120
Probeta 28	49,8	49,95	49,95	49,6	50	49,55	119,98	119,98	119,97
Probeta 29	49,75	49,8	49,8	49,5	49,4	49,55	120	120	120
Probeta 30	49,9	49,85	49,8	49,7	49,85	49,6	120,02	120	119,98
Probeta 31	50,2	50	50	50,45	50,3	50	120	120,15	120,15
Probeta 32	50,2	50	50,1	50	49,95	49,95	120,1	120,1	120,1
Probeta 33	50	50	50	50,1	50,1	50,15	120,1	120,1	120,1
Probeta 34	50,25	50	49,95	50,4	50	50	120	120,1	120,05
Probeta 35	50	50	49,95	50,3	50,25	50,2	120,07	120,09	120,1
Probeta 36	50	50,25	50,15	50	49,85	49,8	120,07	120,08	120,08
Probeta 37	50,5	50	50	50	50	50	120,06	120,06	120,06
Probeta 38	50,1	50	49,95	50	50,1	49,9	120,09	120,09	120,09
Probeta 39	50,2	50,05	50	50,25	50,1	49,95	120,063	120,06	120,07
Probeta 40	50	50	49,95	50,05	50	50,05	120,03	120,02	120,03

Al ser las probetas de geometría conocida se puede calcular el volumen como se muestra en la tabla 12 mediante la siguiente ecuación:

$$V = \textit{Base} * \textit{Altura} * \textit{Profundidad} \quad (4.6)$$

$$V = \textit{lado.a} * \textit{lado.b} * \textit{longitud} \quad (4.7)$$

$$V = \textit{promedio.long.a} * \textit{promedio.long.b} * \textit{promedio.longitud} \quad (4.8)$$

Tabla 12
Cálculo del volumen de cada probeta

Cálculo de volumen de cada probeta				
Medida Promedio				
Núm. Ensayo	Lado A (mm)	Lado B (mm)	Longitud (cm)	Volumen (m^3)
Probeta 1	51,02	51,02	120	0,00312324
Probeta 2	50,52	50,42	119,98	0,003055622
Probeta 3	50,85	50,88	118,8	0,003073852
Probeta 4	51,77	51,93	120	0,003226099
Probeta 5	50,88	50,78	120	0,00310083
Probeta 6	51,75	51,73	120,05	0,003213979
Probeta 7	51,90	51,87	120	0,003230256
Probeta 8	51,77	51,80	120	0,003217816
Probeta 9	50,50	50,33	120	0,0030502
Probeta 10	51,07	50,98	120	0,003124259
Probeta 11	50,98	50,95	120,03	0,00311777
Probeta 12	50,62	50,32	119,98	0,003055598
Probeta 13	50,58	50,47	119,98	0,003062688
Probeta 14	50,57	50,78	120	0,003081533
Probeta 15	51,07	50,83	119,98	0,003114418
Probeta 16	50,52	50,47	119,98	0,003058652
Probeta 17	50,32	50,37	119,95	0,003039872
Probeta 18	50,37	50,25	119,95	0,003035845
Probeta 19	50,48	50,57	119,925	0,003061414
Probeta 20	49,57	49,78	119,95	0,002959879
Probeta 21	49,63	49,73	119,98	0,0029615
Probeta 22	49,98	49,88	119,98	0,002991379
Probeta 23	49,83	49,62	119,98	0,002966459
Probeta 24	49,97	49,97	120	0,002996001
Probeta 25	49,90	49,52	119,93	0,002963205
Probeta 26	49,48	49,62	119,95	0,00294501
Probeta 27	49,70	49,72	120	0,002965102
Probeta 28	49,90	49,72	119,98	0,002976414
Probeta 29	49,78	49,48	120	0,002956134
Probeta 30	49,85	49,72	120	0,002974051
Probeta 31	50,07	50,25	120,1	0,003021536
Probeta 32	50,10	49,97	120,1	0,003006499
Probeta 33	50,00	50,12	120,1	0,003009506
Probeta 34	50,07	50,13	120,05	0,003013266
Probeta 35	49,98	50,25	120,09	0,003016193
Probeta 36	50,13	49,88	120,08	0,003002857
Probeta 37	50,17	50,00	120,06	0,003011568
Probeta 38	50,02	50,00	120,09	0,003003188
Probeta 39	50,08	50,10	120,06	0,003012578

Finalmente se estableció la densidad como se puede apreciar en la tabla 13 por la siguiente relación:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (4.9)$$

Donde:

- ρ : densidad
- m: Masa de la probeta
- V: volumen total

Tabla 13
Cálculo de la densidad para cada probeta

Cálculo de la densidad para cada probeta			
Nro.	masa (kg)	V(m ³)	densidad ($\frac{kg}{m^3}$)
Probeta 1	0,44361	0,00312324	142,04
Probeta 2	0,46417	0,00305562	151,91
Probeta 3	0,42834	0,00307385	139,35
Probeta 4	0,45459	0,0032261	140,91
Probeta 5	0,45809	0,00310083	147,73
Probeta 6	0,48651	0,00321398	151,37
Probeta 7	0,3917	0,00323026	121,26
Probeta 8	0,51998	0,00321782	161,59
Probeta 9	0,63338	0,0030502	207,65
Probeta 10	0,52442	0,00312426	167,85
Probeta 11	0,53716	0,00311777	172,29
Probeta 12	0,78628	0,0030556	257,32
Probeta 13	0,65949	0,00306269	215,33
Probeta 14	0,77282	0,00308153	250,79
Probeta 15	0,55921	0,00311442	179,56
Probeta 16	0,76855	0,00305865	251,27
Probeta 17	0,81672	0,00303987	268,67
Probeta 18	0,67896	0,00303584	223,65
Probeta 19	0,81403	0,00306141	265,90
Probeta 20	0,71065	0,00295988	240,09
Probeta 21	0,8855	0,0029615	299,00
Probeta 22	0,81653	0,00299138	272,96
Probeta 23	0,80684	0,00296646	271,99
Probeta 24	0,89681	0,002996	299,34
Probeta 25	0,85612	0,0029632	288,92
Probeta 26	0,75712	0,00294501	257,09
Probeta 27	0,86524	0,0029651	291,81

Continua...

Nro.	masa (kg)	V(m ³)	densidad ($\frac{kg}{m^3}$)
Probeta 28	0,77211	0,00297641	259,41
Probeta 29	0,8008	0,00295613	270,89
Probeta 30	0,81227	0,00297405	273,12
Probeta 31	0,46087	0,00302154	152,53
Probeta 32	0,44262	0,0030065	147,22
Probeta 33	0,4646	0,00300951	154,38
Probeta 34	0,57475	0,00301327	190,74
Probeta 35	0,59645	0,00301619	197,75
Probeta 36	0,44018	0,00300286	146,59
Probeta 37	0,49288	0,00301157	163,66
Probeta 38	0,5794	0,00300319	192,93
Probeta 39	0,4092	0,00301258	135,83
Probeta 40	0,45668	0,00300162	152,14

En la tabla 13 se puede observar los valores de densidades para cada probeta, sin embargo, es necesario considerar acorde a la producción nacional una clasificación de las muestras como se muestra en la tabla 14, cortadas a los 6 años presentando densidades de hasta 195 $[kg/m^3]$, y a los 10 años en valores superiores a los 195 $[kg/m^3]$.

En el caso de los troncos cortados a los 6 años presenta un mínimo valor de 121,26 $[kg/m^3]$ correspondiente a la probeta dos, y un máximo de 192,93 $[kg/m^3]$ correspondiente a la probeta 38, no obstante, para los especímenes cortados a los 10 años se encontró un valor mínimo de 197,75 $[kg/m^3]$ correspondiente a la probeta 35, con un valor máximo de 299,34 $[kg/m^3]$ correspondiente a la probeta 24.

Tabla 14
Clasificación de las probetas por densidad

Clasificación de las probetas por densidad	
Baja Densidad	Alta Densidad
Menores a $195 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Mayores a $195 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
Probeta 1	Probeta 8
Probeta 10	Probeta 12
Probeta 11	Probeta 13
Probeta 15	Probeta 14
Probeta 2	Probeta 16

Continua ...

Baja Densidad	Alta Densidad
Menores a $195 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Mayores a $195 \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
Probeta 3	Probeta 17
Probeta 31	Probeta 18
Probeta 32	Probeta 19
Probeta 33	Probeta 20
Probeta 34	Probeta 21
Probeta 35	Probeta 22
Probeta 36	Probeta 23
Probeta 37	Probeta 24
Probeta 38	Probeta 25
Probeta 39	Probeta 26
Probeta 4	Probeta 27
Probeta 40	Probeta 28
Probeta 5	Probeta 29
Probeta 6	Probeta 30
Probeta 7	Probeta 9

4.5. Análisis micro estructural de la madera de balsa

En esta etapa, se tomaron dos muestras representativas tanto para madera de baja como de alta densidad, siendo estas correspondientes a la de menor y mayor valor, cuyas microestructuras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM). En la figura 58 se muestra la micrografía realizada a una probeta de alta densidad, apreciando la composición de los diferentes tipos de células.

Según la investigación de Silva y Kyriakides en 2007, las fibras son células prismáticas largas con paredes relativamente gruesas que proporcionan soporte mecánico al árbol. La fracción volumétrica de estas compone aproximadamente entre el 80-90%, los rayos se encuentran formando el 8-15%, finalmente el porcentaje restante se halla constituyendo los vasos.

Se realizó el estudio micrográfico obteniendo principalmente de la célula prismática los espesores de las paredes y su longitud del lado, además se analizó las Traqueidas en un corte longitudinal (figura 59), determinando las medidas de espesor y diámetro de las mismas.

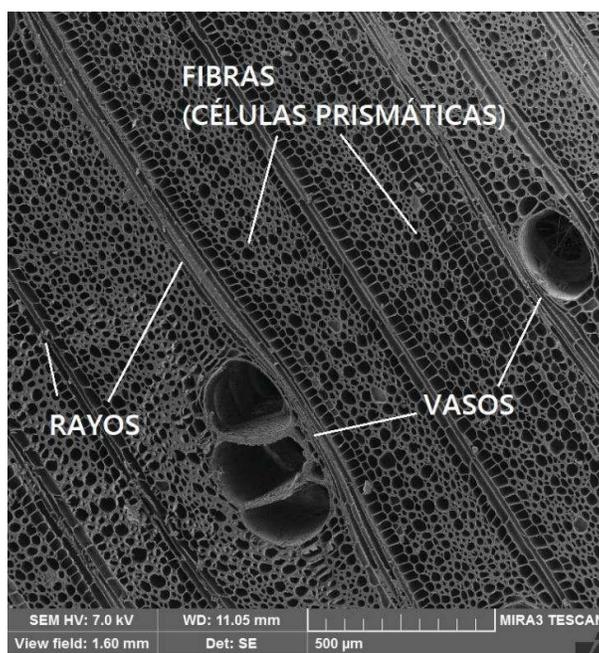


Figura 58: Micrografía de los diferentes tipos de células en madera de balsa de alta densidad

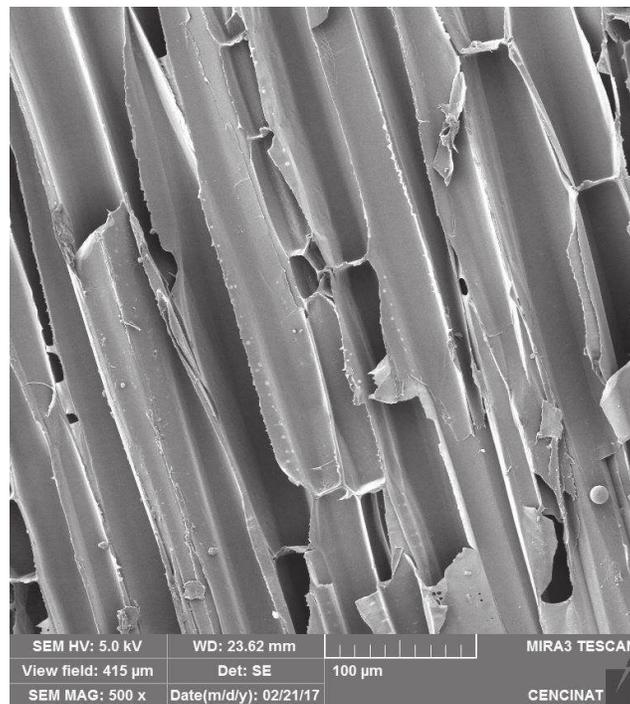


Figura 59: Micrografía Traqueidas en madera de balsa de baja densidad

Las fibras de madera de balsa tienen una forma poligonal irregular en su sección transversal, a menudo parecida a un hexágono (figura 60). Sin embargo, fueron modelados como hexágonos regulares. Según el estudio de Borregas en 2015, la longitud del lado de celda (h) disminuye al aumentar la densidad de balsa teniendo resultados desde 10 a 18 µm correspondiendo a madera de alta a baja densidad respectivamente.

El grosor de la doble pared celular (t) disminuye tres veces en alta con respecto a baja densidad, desde 0,8 hasta 2,2 µm. (Marc, Patrik, Ritva, & Lorna, 2015).

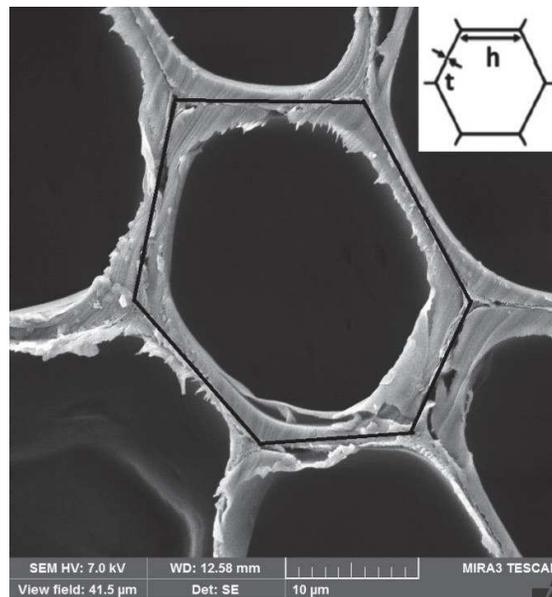


Figura 60: Célula Prismática Madera de balsa alta densidad Espesor de pared (t), Longitud de lado de la celda (h)

4.5.1. Dimensiones de las Células Prismáticas

Longitud de lado

Para el análisis de la microestructura de las células prismáticas se tomó la dimensión de 120 longitudes de lado del polígono representativo tanto para baja como alta densidad, de esto se pudo apreciar que para baja densidad (tabla 15) el valor se encuentra entre 18,25 y 23,48 [μm] y alta densidad (tabla 16) entre 14,91 y 15,46 [μm].

Debiéndose esta variación a las condiciones meteorológicas y medioambientales del lugar geográfico donde se produce la madera de balsa, además de considerar la anisotropía de la madera a lo largo del tronco. A continuación, en la tabla 17 se detalla un resumen.

Tabla 15
Células Prismáticas - Longitud de Lado Baja Densidad

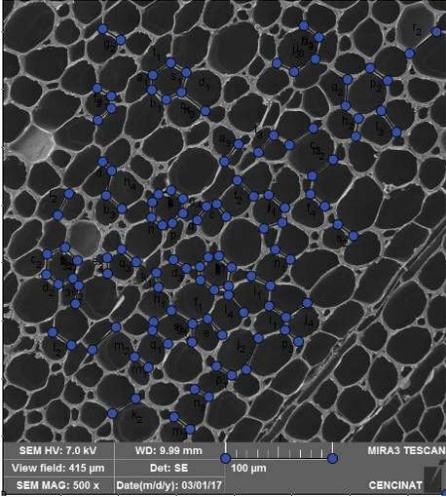
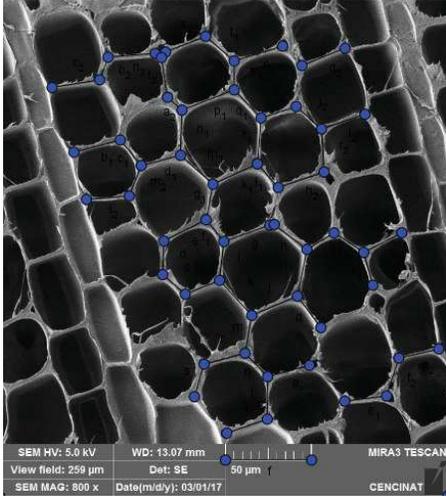
Baja Densidad			
			
Densidad [kg/m^3]	121,26	Densidad [kg/m^3]	192,93
Media [μm]	23,48	Media [μm]	18,25
Desviación estándar	4,78	Desviación estándar	4,22
Número de mediciones realizadas	60	Número de mediciones realizadas	60

Tabla 16
Células Prismáticas - Longitud de Lado Alta Densidad

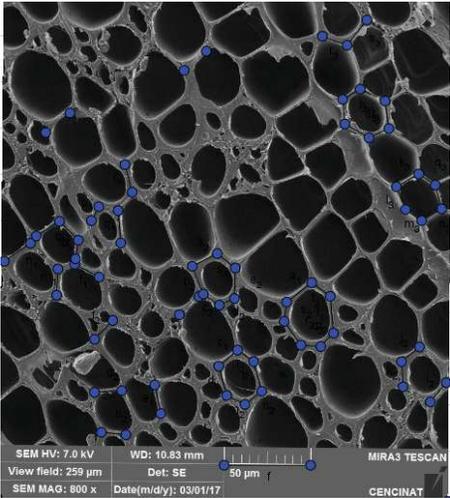
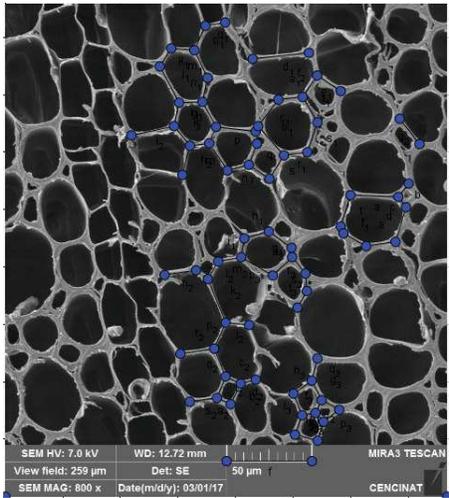
Alta Densidad			
			
Densidad [kg/m^3]	197,75	Densidad [kg/m^3]	299,34
Media [μm]	15,46	Media [μm]	14,91
Desviación estándar	5,04	Desviación estándar	2,65
Número de mediciones realizadas	60	Número de mediciones realizadas	60

Tabla 17
Resumen parámetros de lado células prismáticas

Tabla resumen de parámetros		
Parámetros	Baja densidad	Alta densidad
Long. De lado Mínimo [μm]	9,46	7,09
Long. De lado Máximo [μm]	32,60	33,28
Media grupal [μm]	19,82	15,23
Desviación	5,02	4,21
Número de mediciones realizadas	120	120
Densidad [kg/m^3]	121,26	197,75
Long. Media [μm]	23,48	15,46
Densidad [kg/m^3]	192,93	299,34
Long. Media [μm]	18,25	14,91

Como se puede observar en la tabla 17, en madera de baja densidad a medida que aumenta la misma en un 59,10 %, la longitud de lado de la celda disminuye en un 22,27 %. Para el caso de balsa de alta densidad a medida que aumenta la mencionada en un 51,38 %, la longitud de lado de la celda disminuye en un 3.69 %.

Por lo tanto, el polígono irregular en madera de balsa de baja densidad es mayor en un 130 % comparado con balsa de alta densidad. Además, los valores obtenidos de longitud de lado de la celda presentan una tendencia con una distribución normal sesgada hacia la derecha para maderas de alta (figura 61) y baja densidad (figura 62).

De esto se puede determinar que para probetas de alta densidad existe una media de 15,23 [μm] con un valor predominante de 47 medidas entre 13,5 y 16,5 [μm] (figura 61). En el caso de baja densidad presenta una media de 19,82 [μm] con dos valores predominantes; el primero de 25 medidas entre 16,25 y 18,75 [μm], y el segundo de 24 medidas en un rango de 18,75 y 21,25 [μm] (figura 62).

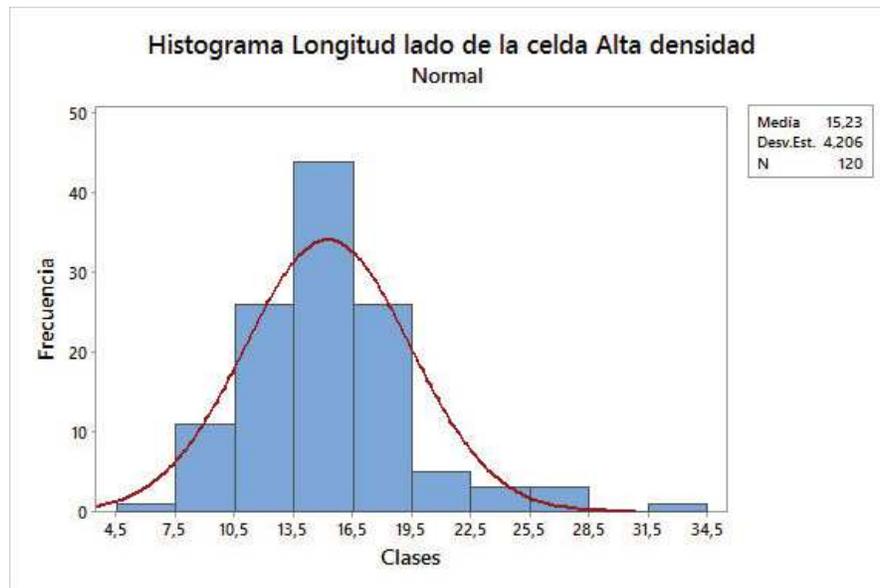


Figura 61: Histograma Longitud de lado Células Prismáticas baja densidad

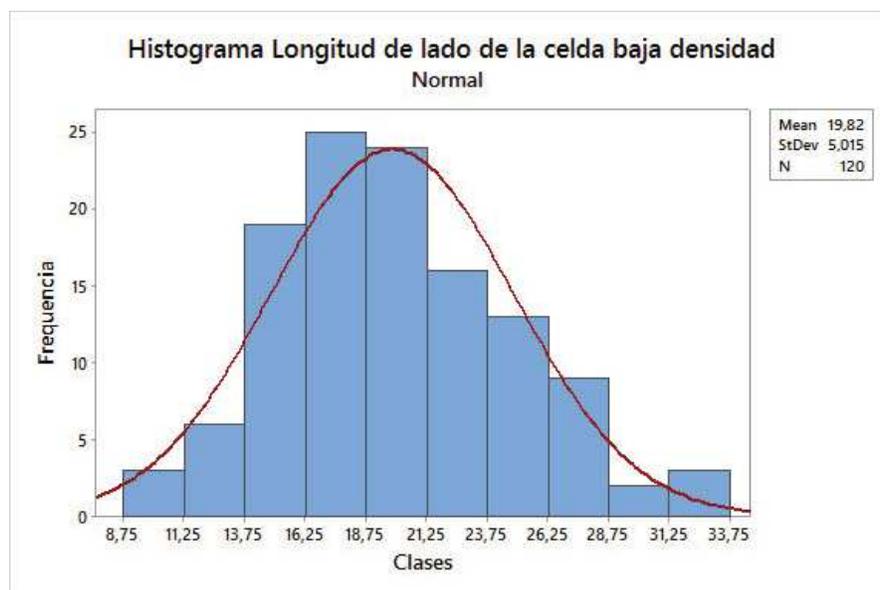


Figura 62: Histograma Longitud de lado Células Prismáticas alta densidad

Espesor de doble pared de la célula Prismática

En cuanto al espesor de doble pared de la célula prismática se han tomado 12 medidas correspondientes a dos dimensiones por cada lado del polígono representativo tanto para baja y alta densidad, considerando esto para baja densidad (tabla 18) el valor encontrado varía entre 1,53 y 1,93 [μm] y alta densidad (tabla 19) entre 3,68 y 2,36 [μm] en grosor de la doble pared celular. A continuación, en la tabla 20 se detalla un resumen.

Tabla 18
Células Prismáticas - Espesor doble Pared Baja densidad

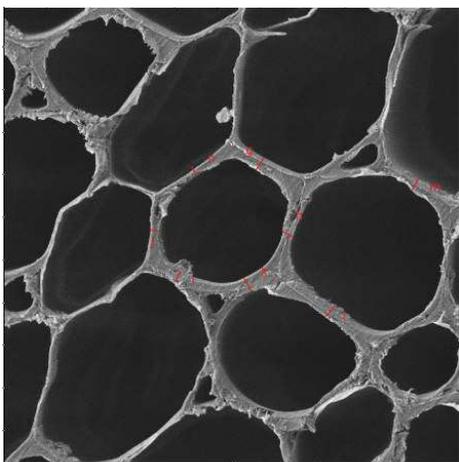
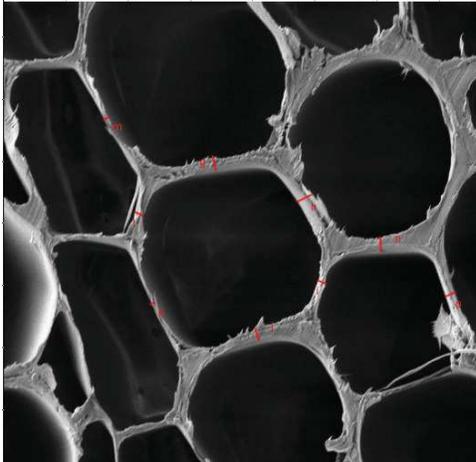
Baja Densidad			
			
<small>SEM HV: 7.0 kV WD: 9.98 mm MIRA3 TESCAN View field: 104 μm Det: SE 20 μm SEM MAG: 2.00 kx Date(m/d/y): 03/01/17 CENCINAT</small>		<small>SEM HV: 5.0 kV WD: 12.82 mm MIRA3 TESCAN View field: 104 μm Det: SE 20 μm</small>	
Densidad [kg/m^3]	121,26	Densidad [kg/m^3]	192,93
Media [μm]	1,53	Media [μm]	1,93
Desviación estándar	0,05	Desviación estándar	0,20
Número de mediciones realizadas	12	Número de mediciones realizadas	12

Tabla 19
Células Prismáticas - Espesor doble Pared Alta densidad

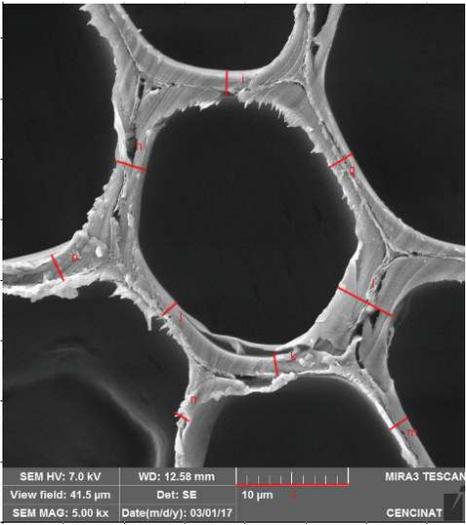
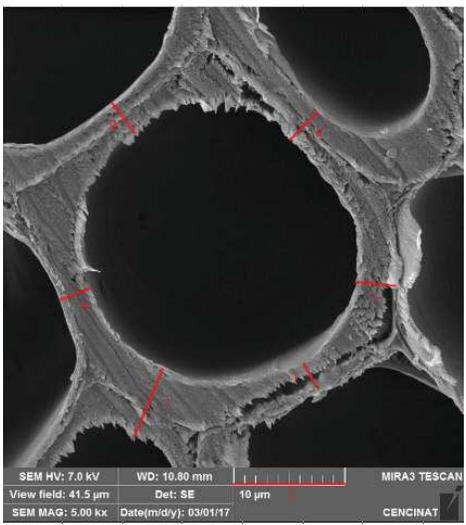
Alta Densidad			
			
Densidad [kg/m^3]	197,75	Densidad [kg/m^3]	299,34
Media [μm]	2,36	Media [μm]	3,68
Desviación estándar	1,17	Desviación estándar	1,48
Número de mediciones realizadas	12	Número de mediciones realizadas	12

Tabla 20
Resumen Parámetros Células Prismáticas - Espesor doble Pared

Tabla resumen de parámetros Espesor doble Pared		
Parámetros	Baja densidad	Alta densidad
Espesor Pared Mínimo [μm]	1,68	1,35
Espesor Pared Máximo [μm]	2,19	6,54
Media grupal [μm]	1,73	2,89
Desviación	0,15	1,42
Número de mediciones realizadas	24	24
Densidad [kg/m^3]	121,26	197,75
Espesor Medio [μm]	1,53	2,36
Densidad [kg/m^3]	192,93	299,34
Espesor Medio [μm]	1,93	3,68

En el caso de baja densidad a medida que aumenta la misma en un 59,10%, el espesor de la doble pared de la célula prismática crece en un 26,14%. En cuanto a la madera de alta densidad el espesor de la doble pared de la célula prismática se agranda en un 55,93% con una adición del 51.37% en el valor de la densidad.

Al comparar los dos grupos de madera de balsa, baja con alta densidad se puede observar un incremento del 167,05% en el espesor de la célula prismática (figura 63).

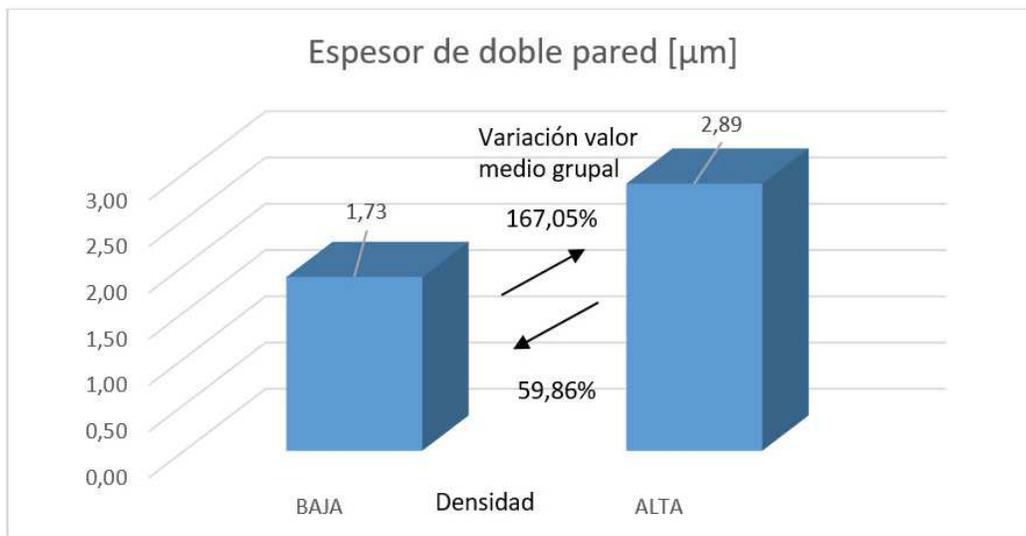


Figura 63: Espesor de Borde - Células Prismáticas Baja vs Alta densidad

4.5.2. Traqueidas

Diámetro de Traqueidas

Anteriormente se ha analizado la célula prismática aproximada a un polígono irregular considerando el plano radial-tangencial, sin embargo, internamente se encuentran formadas por geometrías ovaladas que son mayormente apreciadas en un corte radial - longitudinal. Por tal motivo se ha considerado el estudio de los diámetros de las traqueidas.

Para el respectivo análisis se ha optado por seleccionar tres datos correspondientes al inicio, medio, y final de las mismas, en cada probeta, tanto para baja (tabla 21) como alta densidad (tabla 22). Se ha seleccionado este número de mediciones ya que el diámetro de las traqueidas presenta valores con variaciones mínimas entre medición. De esto en la tabla 23 se presenta un resumen.

Tabla 21
Diámetro de Traqueidas Baja Densidad

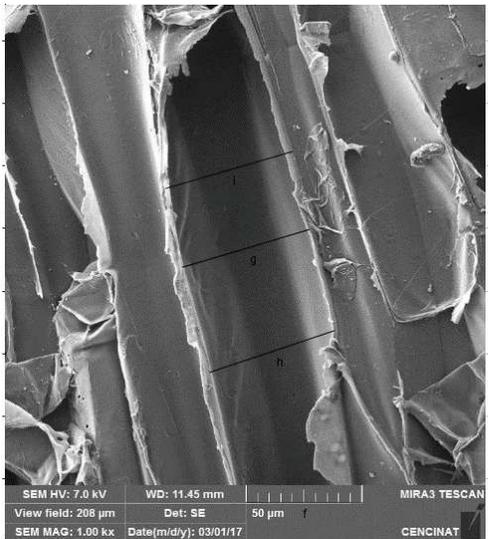
Baja Densidad			
			
Densidad [kg/m^3]	121,26	Densidad [kg/m^3]	192,93
Diámetro Promedio [μm]	60,17	Diámetro Promedio [μm]	56,47

Tabla 22
Diámetro de Traqueidas Alta Densidad

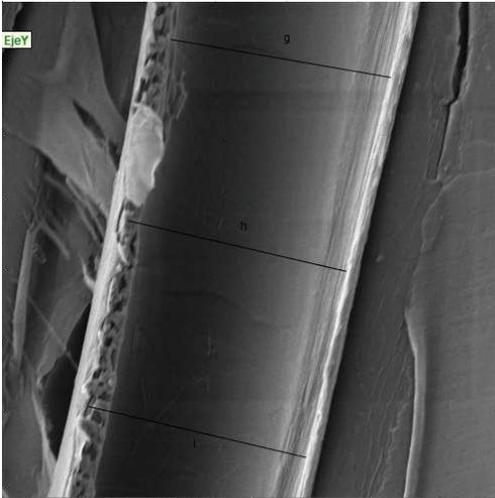
Alta Densidad	
	
Densidad [kg/m^3]	197,75
Densidad [kg/m^3]	299,34
Diámetro Promedio [μm]	21,74
Diámetro Promedio [μm]	18,55

Tabla 23
Resumen Diámetro de traqueidas

Diámetro de traqueidas		Promedio
Densidad [kg/m^3]	Diámetro [μm]	Diámetro [μm]
121,26	60,17	58,32
192,93	56,47	
197,75	21,74	20,15
299,34	18,55	

En caso de madera de baja densidad a medida que aumenta en un 59,10% la densidad, el diámetro de las Traqueidas disminuye aproximadamente en un 6,15%. En el grupo de alta densidad se puede apreciar una disminución del 14,67% en el diámetro de traqueidas considerando el aumento del 16,9% en el valor de la densidad (tabla 23).

En vista que en cada grupo de análisis se ha estimado un valor máximo y mínimo en base a su densidad se ha obtenido una medida promedio correspondiente a cada grupo, con la cual se puede apreciar una disminución del 34,55 % en diámetro de traqueidas de alta con respecto a baja densidad (figura 64).

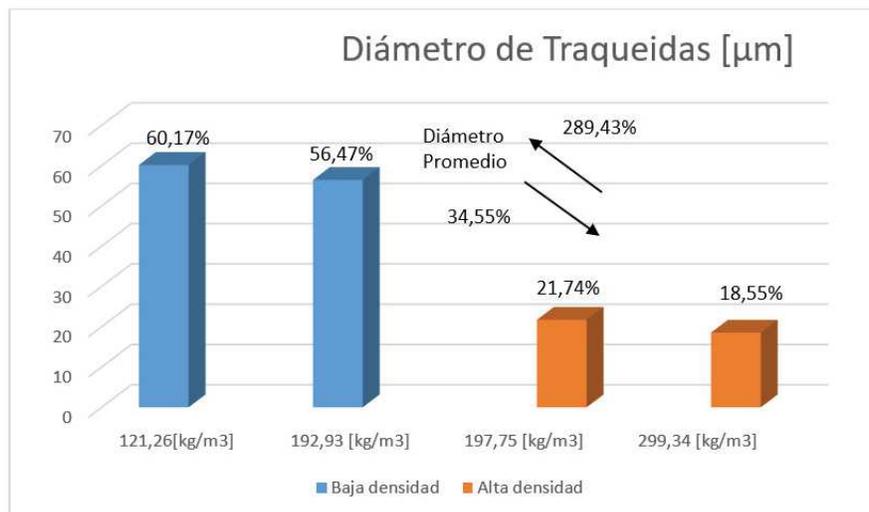


Figura 64: Relación Diámetro de Traqueidas baja vs alta densidad

Espesor de pared de Traqueidas

Finalmente se realizó un estudio del espesor - paredes de las traqueidas para el cual se obtuvo cinco medidas distribuidas a lo largo de las mismas tanto para baja como alta densidad, considerando esto para baja densidad el valor promedio encontrado varía entre 0,67 y 1,02 [μm] (tabla 24) y alta densidad entre 1,15 y 2,54 [μm] (tabla 25). Además, se pudo apreciar una disminución del espesor promedio grupal de 45,95 %, en maderas de alta con respecto a baja densidad (figura 65).

Tabla 24
 Espesor traqueidas baja densidad

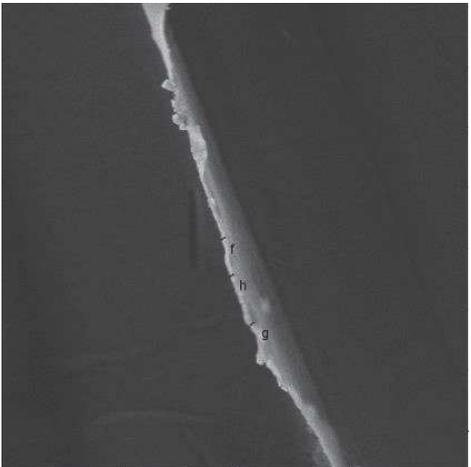
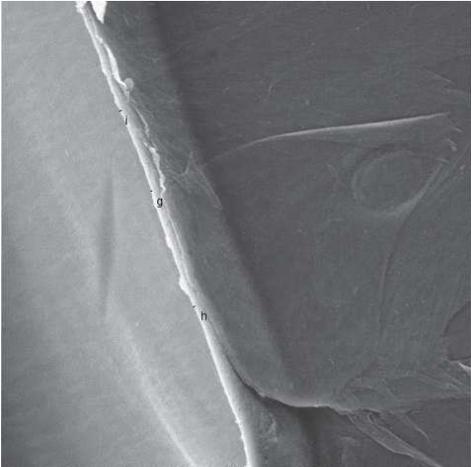
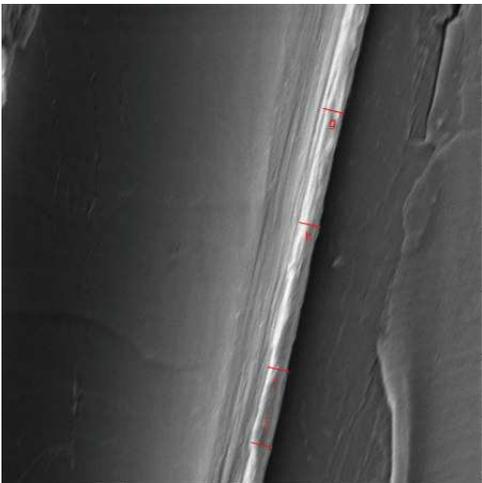
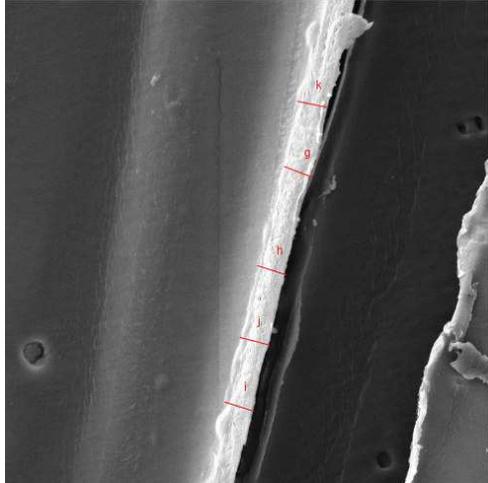
Baja Densidad			
			
Densidad [kg/m^3]	121,26	Densidad [kg/m^3]	192,93
Espesor promedio [μm]	0,67	Espesor promedio [μm]	1,02

Tabla 25
Espesor traqueidas alta densidad

Alta Densidad			
			
SEM HV: 5.0 kV	WD: 12.21 mm	MIRA3 TESCAN	
View field: 25.9 µm	Det: SE	5 µm	
SEM MAG: 8.00 kx	Date(m/d/y): 03/01/17	CENCINAT	
Densidad [kg/m ³]	1977,75	Densidad [kg/m ³]	299,34
Espesor promedio [µm]	1,15	Espesor promedio [µm]	2,54

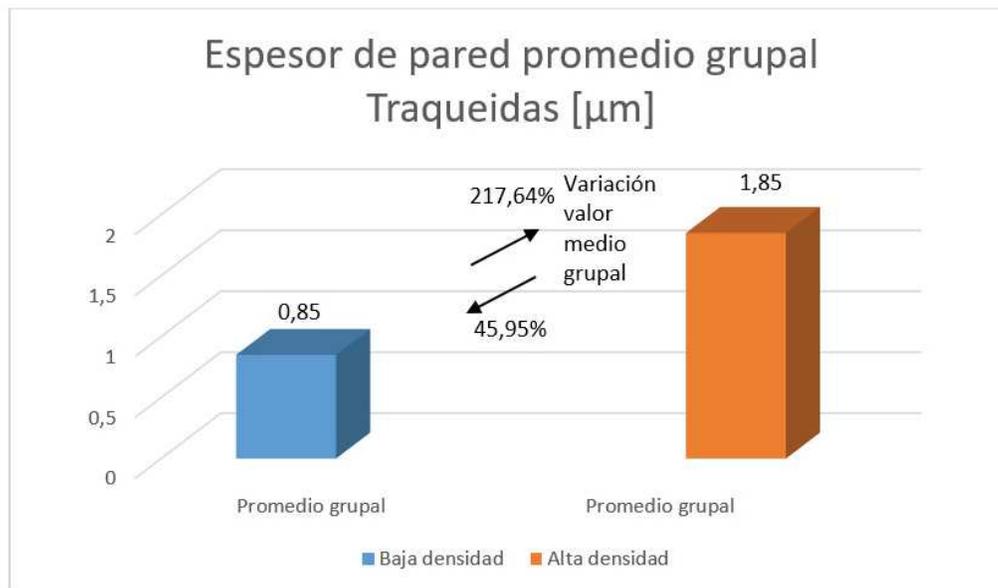


Figura 65: Espesor de pared promedio de Traqueidas baja vs alta densidad

En madera de balsa de baja densidad a medida que aumenta la misma en un 59,10%, el espesor de la pared de traqueidas aumenta un 52,24%. En cuanto a la madera de alta densidad el espesor de la pared de traqueidas se aumenta un 220,87% con una adición del 51.37% en el valor de la densidad. Al comparar los dos grupos de madera de balsa en un espesor promedio, baja con alta densidad se puede observar un incremento del 217,64% en el espesor de la pared de traqueidas (figura 65).

4.6. Obtención MOE Estática

En los ensayos estáticos de la presente investigación dada la naturaleza ortotrópica de la madera de balsa, se ha estimado el sentido longitudinal de las fibras para su respectivo análisis, por tal motivo para la obtención del módulo de elasticidad a flexión estática se ha considerado el procedimiento que rige la norma D 143 – 14, la cual menciona que los especímenes de prueba deben tener sección transversal cuadrada de 50 [mm] de lado y una longitud de 750 [mm]. Cada prueba se desarrolló aplicando una carga central en la viga con longitud entre apoyos de 710 [mm].

Se ensayaron 20 probetas tanto para baja como alta densidad, teniendo un total de 40

pruebas, de las cuales se obtuvo la medida de la deformación acorde a la carga aplicada para posteriormente determinar el MOE estático. A continuación, se detalla un ejemplo de cálculo para una probeta con una densidad de $299,34 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Utilizando la ecuación de la deflexión para el caso de una viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro.

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I} \quad (4.10)$$

Datos de la experimentación:

- $\delta=5 \text{ [mm]}$
- $P=1775 \text{ [N]}$
- $L=750 \text{ [mm]}$
- $I=5,2 \times 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}$

Despejando Módulo de Elasticidad de ecuación 4.8.

$$E = \frac{P * L^3}{48 * \delta * I} \quad (4.11)$$

$$E = \frac{1775 * 0,75^3}{48 * 0,005 * 5,2 * 10^{-7}}$$

$$E = 5990625000 \text{ [Pa]} = 5,99 \text{ [GPa]}$$

En vista de la naturaleza de los ensayos y la extensión de los datos obtenidos, en las tablas 26 - 27 se presenta un resumen del valor del MOE estático promedio para cada probeta ensayada, sin embargo, para una mejor comprensión se ha realizado un esquema de fuerza – deformación considerado 8 probetas representativas tanto para baja y alta densidad (figura 66).

Tabla 26
MOE estático baja densidad

Baja densidad	
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Módulo Estático Promedio [Pa]
121,26	1.847.454.134,92
135,83	2.412.647.623,52
139,35	2.491.548.589,04
140,91	2.526.703.179,00
142,04	2.494.770.338,62
146,59	2.738.464.285,71
147,22	2.669.887.510,50
147,73	2.681.536.689,59
151,37	2.764.963.406,54
151,91	2.414.775.146,83
152,14	2.782.696.270,44
152,53	2.861.399.455,78
154,38	2.834.180.821,34
161,59	3.001.857.287,57
163,66	3.050.272.875,15
167,85	2.590.512.947,09
172,29	3.200.475.918,37
179,56	3.427.493.164,22
190,74	3.698.226.668,33
192,93	3.747.626.894,18

Tabla 27
MOE estático Alta densidad

Alta densidad	
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Módulo Estático Promedio [Pa]
197,75	3.870.011.296,07
207,65	4.019.887.900,23
215,33	4.307.744.099,01
223,65	4.393.221.650,79
240,09	4.940.016.217,36
250,79	5.364.771.804,23
251,27	5.231.048.328,21
257,09	5.383.801.686,12
257,32	4.639.522.708,99
259,41	5.456.003.010,67
265,90	5.617.048.073,73

Continua...

Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Módulo Estático Promedio [Pa]
268,67	5.690.743.380,10
270,89	5.899.381.663,49
271,99	5.779.313.816,09
272,96	5.805.348.576,43
273,12	5.809.576.272,64
288,92	5.287.430.168,25
291,81	6.314.056.710,46
299,00	6.510.569.520,76
299,34	5.966.113.657,85

En la figura 66, se puede apreciar como la pendiente del módulo de elasticidad estático va aumentando a medida que crece la densidad de cada probeta. Los ensayos tienen una tendencia similar aproximándose a un comportamiento lineal demostrando que se está trabajando en el límite elástico, cumpliéndose lo anteriormente propuesto.

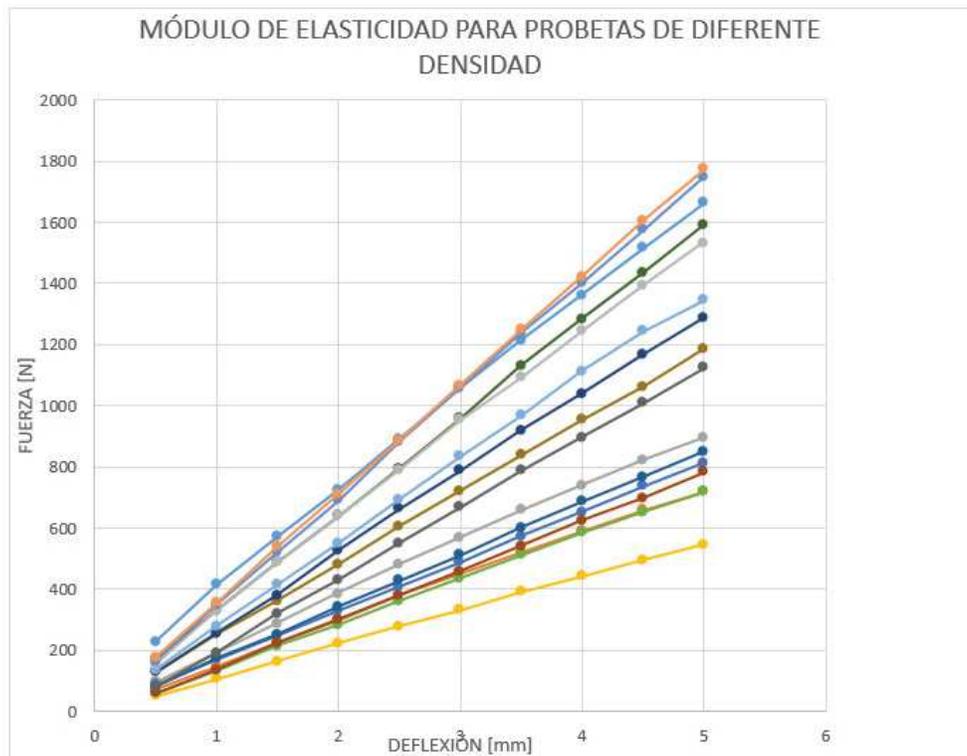


Figura 66: Módulo de Elasticidad de probetas de diferente densidad

Como se puede observar el valor mínimo concerniente al comportamiento descrito por la línea de color amarillo, corresponde a la probeta de menor densidad ($121,26 \text{ [kg/m}^3\text{]}$). Por el lado contrario, la tendencia de color tomate proporciona el máximo valor, el cual está descrito por la probeta de mayor densidad ($299,33 \text{ [kg/m}^3\text{]}$). Por tal razón se puede establecer que el módulo de elasticidad de la madera de balsa se encuentra entre $1,84 \text{ [GPa]}$ a $5,96 \text{ [GPa]}$.

4.7. Coeficiente de elasticidad [k]

Otro parámetro importante a considerar en el análisis estático es el coeficiente de elasticidad, el cual está determinado por la ecuación de la deflexión de una viga simplemente apoyada que se muestra a continuación:

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I} \quad (4.12)$$

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{48 * E * I}{L^3} \quad (4.13)$$

Para este análisis se ensayaron 20 probetas tanto para baja como alta densidad, teniendo un total de 40 pruebas, de las cuales se obtuvo la medida de la deformación acorde a la carga aplicada para posteriormente determinar el coeficiente de restitución elástico, en las tablas 28-29 se presentan los valores obtenidos acorde a la densidad de cada probeta.

Tabla 28
Coeficiente de restitución elástica K acorde a la densidad

Baja densidad		
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Coeficiente K [N/m]	Incremento K (%)
121,26	110879,05	0 %
135,83	125771,25	13 %
139,35	140585,85	12 %
140,91	143248,22	2 %
142,04	149191,16	4 %
146,59	163635,42	10 %
147,22	165392,60	1 %
147,73	152119,05	8 %
151,37	142683,68	6 %
151,91	144745,11	1 %
152,14	157917,61	9 %
152,53	170882,54	8 %
154,38	184392,20	8 %
161,59	180219,38	2 %
163,66	173265,58	4 %
167,85	155078,25	10 %
172,29	190214,29	23 %
179,56	188344,23	1 %
190,74	210486,81	12 %
192,93	224541,47	7 %
Promedio Baja densidad		7 %

Tabla 29
Coeficiente de restitución elástica K acorde a la densidad

Alta densidad		
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Coeficiente K [N/m]	Incremento K (%)
197,75	220958,37	2 %
207,65	240945,71	9 %
215,33	265928,18	10 %
223,65	262125,40	1 %
240,09	262834,76	0 %
250,79	320334,76	22 %
251,27	298788,74	7 %
257,09	307604,52	3 %
257,32	276658,55	10 %
259,41	346949,68	25 %
265,90	359601,14	4 %
268,67	349491,44	3 %
270,89	351991,75	1 %
271,99	340684,47	3 %
272,96	331946,17	3 %
273,12	354281,96	7 %
288,92	319250,00	10 %
291,81	361344,87	13 %
299,00	372708,13	3 %
299,34	356251,47	4 %
Promedio Alta densidad		7 %

Para una mejor visualización en la figura 67 se muestra el comportamiento del coeficiente de elasticidad de la madera de balsa a medida que su densidad va aumentando.

En las tablas 27 y 28 se puede apreciar el comportamiento creciente del coeficiente de elasticidad de la madera de balsa tanto para baja como alta densidad, se pudo determinar que el aumento promedio es del 7 %, para cada grupo. Además, muestra una tendencia lineal teniendo una correlación de 96,4 %. La ecuación proporcionada por la figura 67 puede ser empleada para la obtención de dicho coeficiente con un margen de error menor del 4 %. A su vez es medio para obtener del módulo de elasticidad estático en el sentido longitudinal, por la cual es necesario solamente conocer la densidad de dicha probeta

y calcular el valor de K aplicando la ecuación 23. Los valores de error calculados para el coeficiente de elasticidad no son significativamente altos teniendo en cuenta que la madera de balsa es un material no homogéneo.

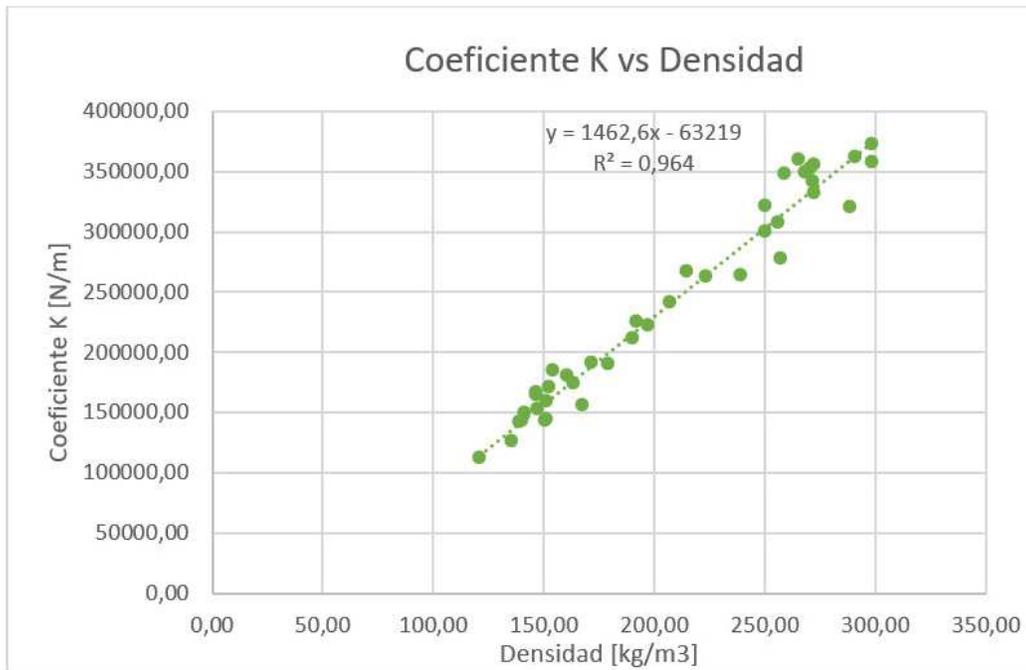


Figura 67: Gráfica Coeficiente de Elasticidad vs Densidad

4.8. Análisis Dinámico

4.8.1. Aceleración – Tiempo (Baja Densidad)

Para el análisis del comportamiento dinámico de madera de balsa de baja densidad se ha considerado tres probetas representativas partiendo desde la de menor, medio y alto valor de densidad. Se han tomado solamente estas 3 probetas representativas para poder apreciar el comportamiento de aceleración – tiempo, ya que no se podría visualizar claramente las curvas subamortiguadas representando el total de probetas ensayadas. En la tabla 30 se detalla las 3 probetas utilizadas con su respectiva densidad.

Tabla 30
 Probetas análisis dinámico baja densidad

Densidad [kg/m^3]	Correspondencia Valor
121,26	Mínimo
151,91	Intermedio
192,93	Mayor

En la figura 68 se muestra las curvas subamortiguadas de las probetas antes mencionadas.

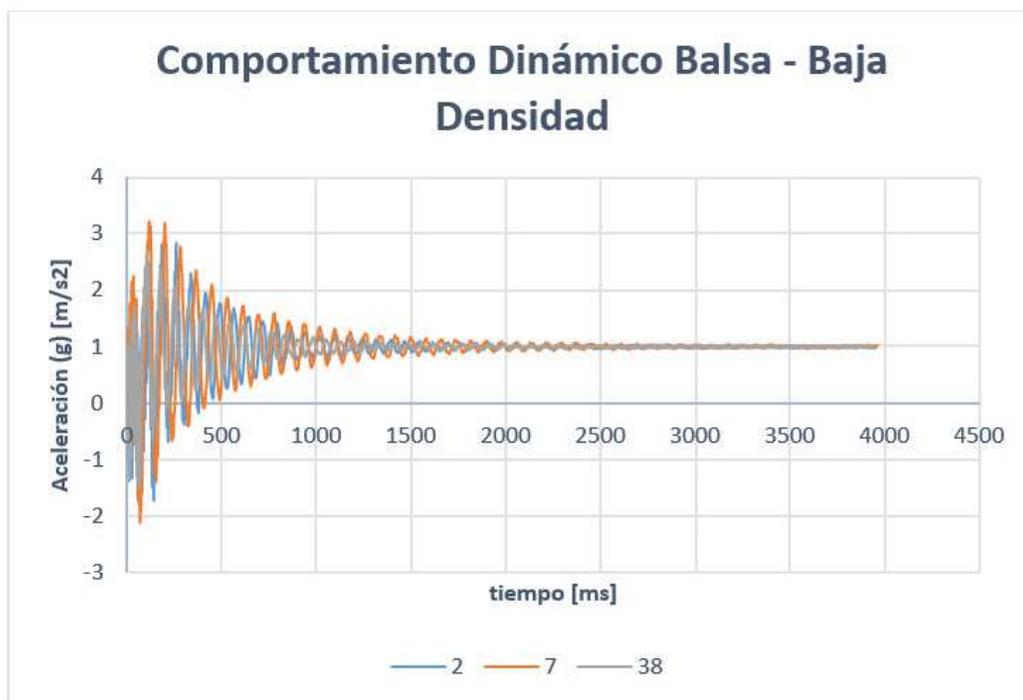


Figura 68: Gráfica Comportamiento Dinámico Balsa - Baja Densidad

Las curvas de las tres probetas se comportan de manera distinta en respuesta al estímulo externo que se aplicó sobre cada una de ellas (figura 68). Cada una tiene un comportamiento distinto al transferir la onda producida por el impacto, teniendo amplitudes diferentes y desfases con respecto de una con otra. No se ha podido cuantificar en medida el desfase de cada una de las curvas por la naturaleza del fenómeno; las curvas

han sido obtenidas a partir de experimentación. Por tal motivo para lograr obtener una medida del desfase, es necesario aproximar dichas curvas a un modelo matemático que describa el comportamiento en su totalidad de la madera de balsa cuando está sometido a una fuerza de impacto en una configuración de empotramiento.

Entre las causas principales para originar la variabilidad en la amplitud de las curvas y su decrecimiento logarítmico, se puede considerar la relación directa con su microestructura ya que al ser la madera de balsa un ente vivo que está en constante crecimiento se desarrolla acorde a las condiciones medioambientales en que se encuentra, considerando que existe incertidumbre entre probetas del mismo árbol.

4.8.2. Aceleración – Tiempo (Alta Densidad)

Para el análisis del comportamiento dinámico en alta densidad se seleccionaron de la misma manera que en el estudio anterior tres probetas, la de menor, medio y alto valor de densidad, correspondiendo a las probetas de 197.75, 259.41 y 299.34 [kg/m^3] respectivamente. Llegando al mismo resultado que se pudo observar en probetas de baja densidad. Es por ello que requiere un análisis extra con la finalidad de conocer el comportamiento dinámico en dos probetas con similar valor respecto a la influencia del aumento de la densidad en una probeta patrón.

Básicamente este último análisis contempla una probeta patrón comparada con dos especímenes que posean similar aumento de densidad. Se ha seleccionado la probeta con densidad 259,41 [kg/m^3] como patrón. Para la comparación se han considerado las probetas con densidades 299,00 y 299,34 [kg/m^3]. Este estudio se lo ha considerado teniendo como hipótesis que el comportamiento dinámico debería ser semejante entre muestras de las mismas características. En la tabla 31 se muestran las características de las muestras seleccionadas para este análisis con respecto a la probeta patrón (259,41 [kg/m^3]).

Tabla 31
Muestra patrón respecto a probetas de similares densidades

Densidad [kg/m^3]	Variación (%)	Densidad [kg/m^3]	Variación (%)
259,41	0%	259,41	0%
299,00	15,26%	299,34	15,39%

Se presenta a continuación el comportamiento dinámico del estudio mencionado anteriormente (figura 69).

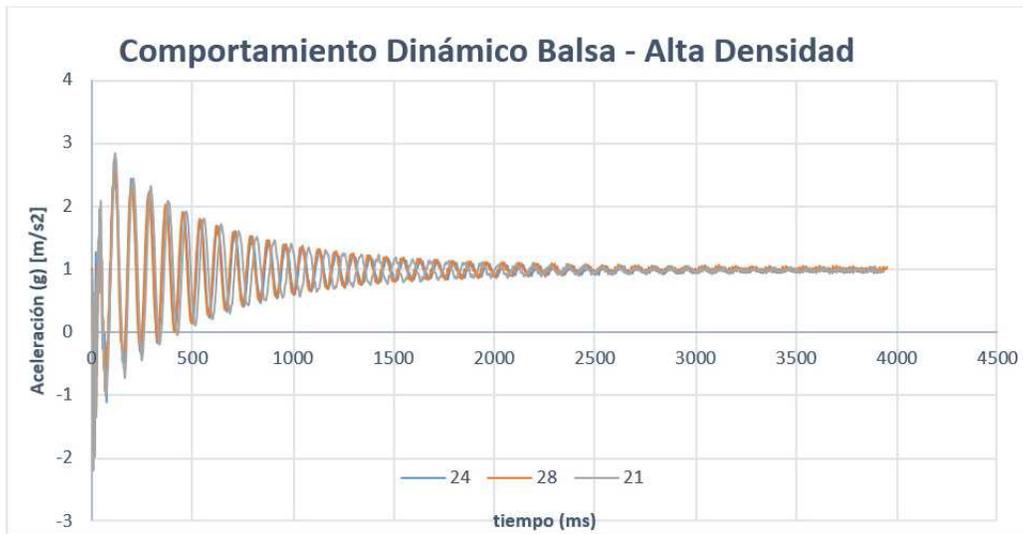


Figura 69: Gráfico Comportamiento Dinámico Balsa - Alta Densidad

El comportamiento de la probeta de densidad $299,34 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ se asemeja a la probeta de densidad $259,51 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (figura 69), sin embargo, existen valores picos más elevados que la segunda probeta en el comienzo de la vibración. Esto demuestra que un aumento del 15% en la densidad en probetas de alta no altera significativamente su curva subamortiguada como es el caso de maderas de baja densidad. Por otro lado, la probeta de densidad $299,00 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, mantiene el mismo comportamiento que la probeta patrón, pero transcurrido los 500 [ms] sufre un desfase de la probeta de densidad $259,51 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ en 30 [ms] . Señalando que la densidad no solamente es el único factor que incide en el comportamiento dinámico. Los factores involucrados como el tipo de corte y la misma anisotropía de la madera de balsa influyen en la vibración transversal.

4.8.3. Análisis comportamiento Dinámico Alta y Baja Densidad

En este análisis se ha tomado en consideración dos probetas tanto para alta y baja densidad. Representando valores mínimos y máximos de cada grupo respectivamente (figura 70).

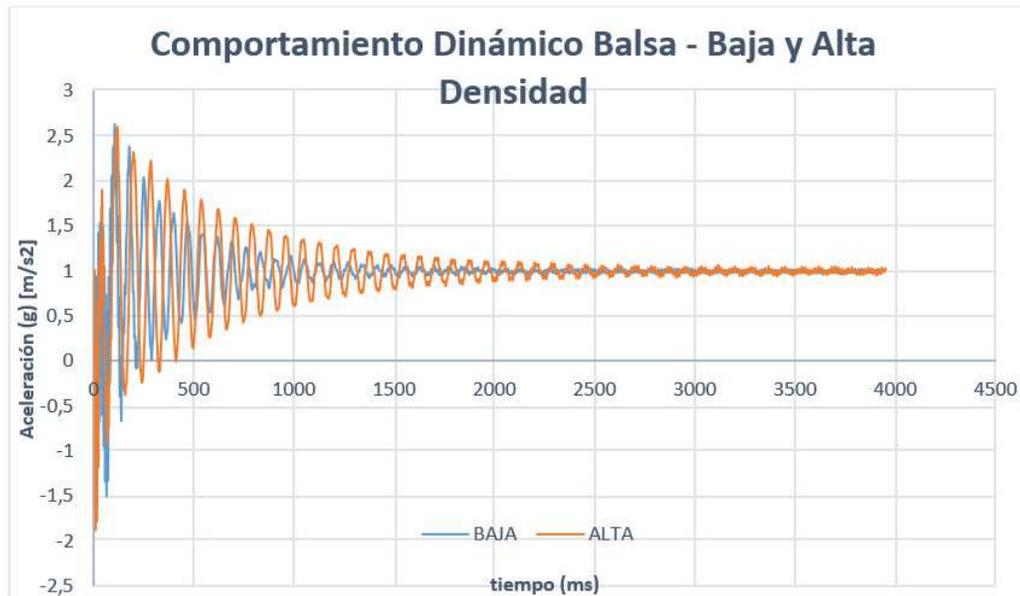


Figura 70: Comportamiento Dinámico de Baja vs Alta Densidad

Se ha obtenido las amplitudes de aceleración -tiempo tanto en la madera de baja como alta densidad para determinar el porcentaje de variación en el comportamiento dinámico. Se presenta a continuación en la tabla 32 y la figura 71 dicho cambio acorde a cada probeta.

Tabla 32

Variación de la amplitud en balsa de baja y alta densidad

Variación de la amplitud baja - alta densidad				
Rango [ms]	M. Baja	M. Alta	Incremento (%)	
366,8	400,2	1,61	2,02	25,35 %
450	465,2	1,54	1,89	23,21 %
538,8	550,4	1,37	1,76	28,31 %
613,2	620,4	1,35	1,69	24,72 %
Promedio				25,40 %

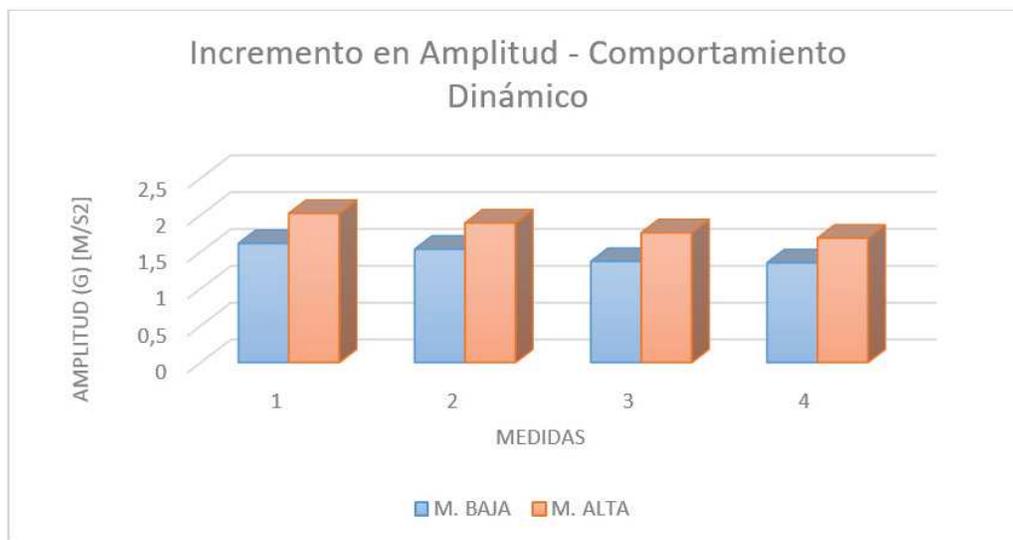


Figura 71: Gráfico Incremento en Amplitud - Comportamiento Dinámico

Los datos proporcionados en la tabla 32 han sido tomados donde los valores pico de las curvas de alta y baja densidad son marcadas y visibles, ya que transcurridos los 700 [ms] no son apreciables en las probetas de baja densidad. Aun así, es evidente que transcurrido el tiempo existe una notoria diferencia entre los decrecientes logarítmicos de las curvas de alta y baja densidad.

Cuando varía la densidad de 192,93 a 259,41 [kg/m^3] existe un incremento promedio en la amplitud de la aceleración del 25,4%. A mayor densidad es menor la capacidad de absorción de energía.

4.8.4. Histograma de Frecuencias

En vista de la variabilidad de la experimentación, se ha realizado un histograma de frecuencias para conocer la incidencia de la frecuencia natural.

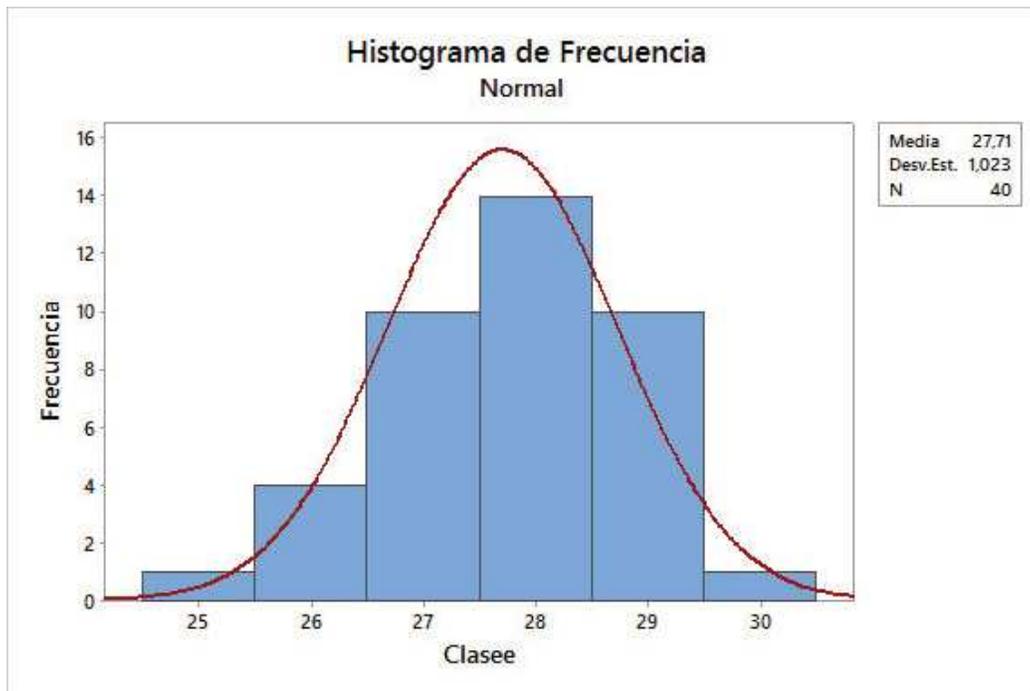


Figura 72: Histograma de Frecuencias (Frecuencias Naturales)

El comportamiento de la experimentación tiende a una distribución normal ligeramente sesgada hacia la izquierda (figura 72), teniendo como valores predominantes en un 35 % frecuencias naturales entre 27,5 a 28,5 [Hz]. No obstante, el 85 % se encuentra en un rango de 26,5 a 29,5 [Hz]. Teniendo como media un valor de 27,71 [Hz] y una desviación estándar de 1,023.

4.9. Obtención MOE dinámico

Para la obtención de dicho módulo se ha partido de la teoría de vibración transversal en vigas. El módulo de elasticidad dinámico emplea el conocimiento de la densidad de la probeta, longitud, espesor y frecuencia natural de vibración que se puede obtener en distintas configuraciones del experimento.

En primera instancia el experimento se ha definido como una viga en voladizo con un extremo empotrado y un extremo libre, el cual es sometido a una fuerza de impacto de 2[N] por medio de un mecanismo tipo martillo que causara la vibración del espécimen.

En el extremo libre a una distancia de 50 [mm] del borde se ha colocado un acelerómetro que será el encargado de adquirir la señal del comportamiento subamortiguado mediante un programa de análisis de vibraciones, el cual por medio de la transformada rápida de Fourier se puede conocer la frecuencia natural o frecuencia de resonancia y su amplitud espectral. Se han analizado los espectros de frecuencia de 20 probetas tanto para baja como alta densidad, de esto se estudió la variabilidad que presenta su comportamiento, a continuación, se detalla en la tabla 33 un resumen de los parámetros espectrales en su primer modo de vibración, sin embargo, se procedió a realizar un estudio más detallado de tres probetas representativas para baja como para alta densidad.

Tabla 33
Amplitud y frecuencia espectral acorde a la densidad

Tipo	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Amplitud espectral [g]	Frecuencia de resonancia [Hz]
Baja Densidad	121,26	0,056	26,1
	135,83	0,053	28,1
	139,35	0,044	27,1
	140,91	0,043	27,08
	142,04	0,043	25,4
	146,59	0,043	27,9
	147,22	0,043	27,5
	147,73	0,043	27,3
	151,37	0,042	26,9
	151,91	0,041	25,8
	152,14	0,04	25,9
	152,53	0,039	27,3
	154,378	0,039	28,1
	161,59	0,039	28,67
	163,66	0,038	28,75
	167,85	0,034	26,8
	172,29	0,034	27,2
	179,56	0,034	27,4
	190,74	0,033	27,1
192,93	0,032	29,3	
Alta Densidad	197,75	0,031	28
	207,65	0,030	29
	215,33	0,030	27,7
	223,65	0,029	27,5
	240,09	0,027	27,8
	250,79	0,025	27,5
	251,27	0,025	27,5
	257,086	0,025	28,7
	257,32	0,025	26,55
	259,41	0,025	28,42
	265,90	0,024	28,75
	268,67	0,024	27,67
	270,89	0,023	28,4
	271,99	0,023	29,92
	272,96	0,023	28,58
	273,12	0,023	28,9
	288,92	0,023	26,2
	291,81	0,021	28,1
	299,00	0,017	28,6
299,34	0,017	28,8	

Anteriormente se mencionó de tres probetas representativas en baja como alta densidad las cuales corresponden al mínimo, al intermedio y al máximo valor de cada grupo de densidad. A continuación, en las figuras 73 a la 78, se ilustran las gráficas del espectro de frecuencias para cada probeta mencionada.

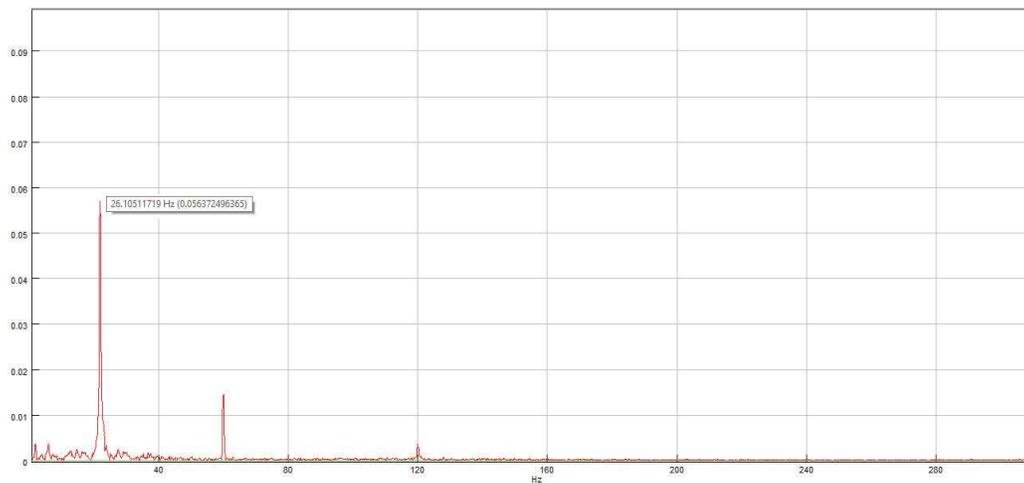


Figura 73: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 121,26 $[kg/m^3]$

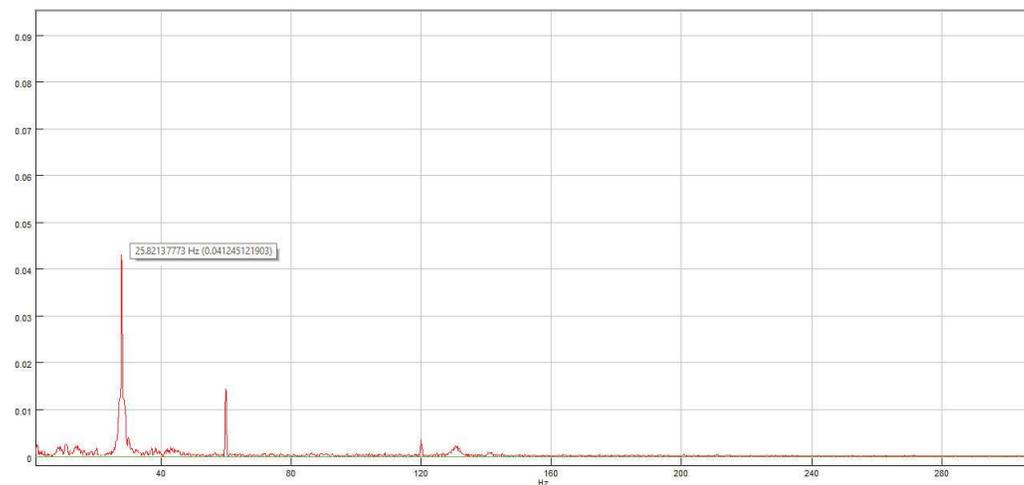


Figura 74: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 151,91 $[kg/m^3]$

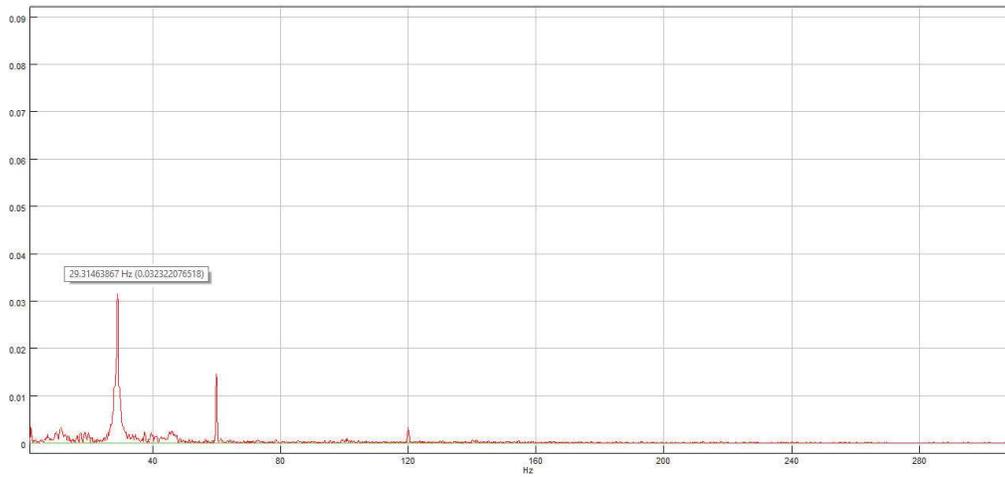


Figura 75: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad $192,92 [kg/m^3]$

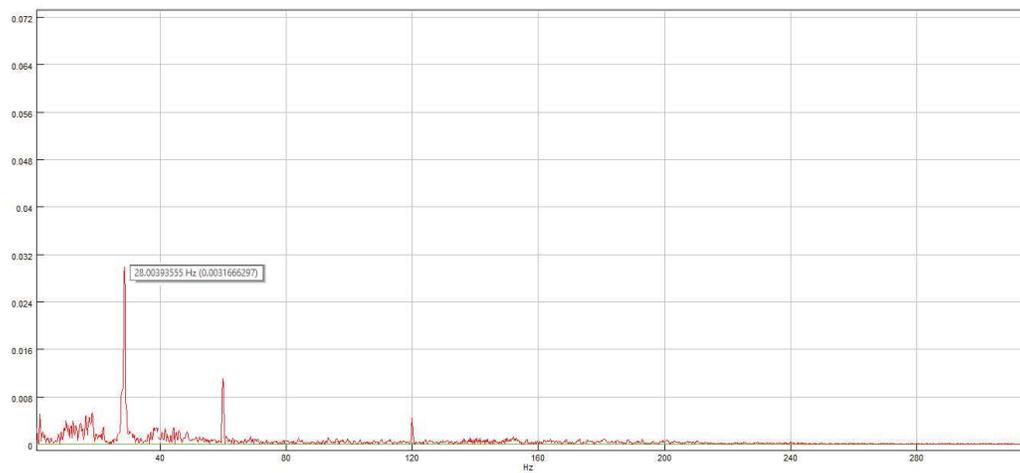


Figura 76: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad $197,75 [kg/m^3]$

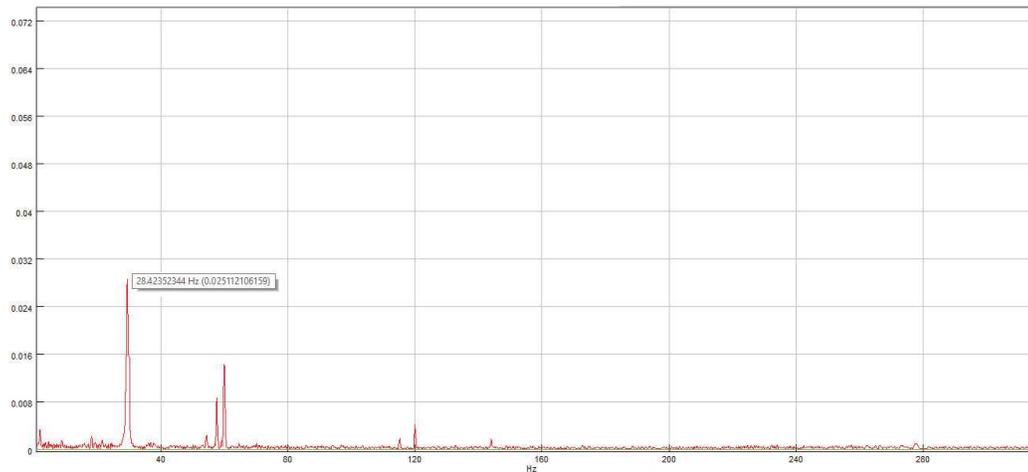


Figura 77: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 259,41 $[kg/m^3]$

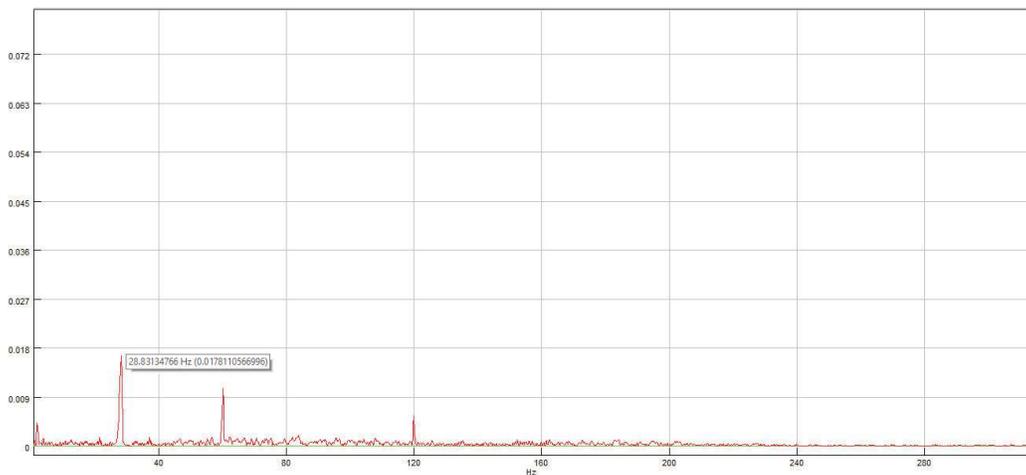


Figura 78: Espectro de frecuencias amplitud de aceleración densidad 299,34 $[kg/m^3]$

De acuerdo a la gráfica del espectro de frecuencias de cada probeta se puede determinar que a medida que la densidad aumenta, la amplitud espectral disminuye como se puede apreciar en la tabla 34, esto debido a que mayor densidad menor respuesta de vibración ante un impacto, por consiguiente, menores amplitudes espectrales como se puede observar en la figura 79. En cuanto a la frecuencia de resonancia no existe un patrón de variación ya que es una propiedad intrínseca de cada viga y está estrechamente

relacionada con la microestructura.

Tabla 34
Relación amplitud espectral con respecto a la densidad

Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Frecuencia de Resonancia [Hz]	Amplitud Espectral [g]	Decremento %
121,26	26,1	0,056	-
151,91	25,8	0,041	26,78
192,93	29,3	0,032	21,95
197,75	28	0,031	3,125
259,41	28.42	0,025	19,35
299,34	28,8	0,017	32,00

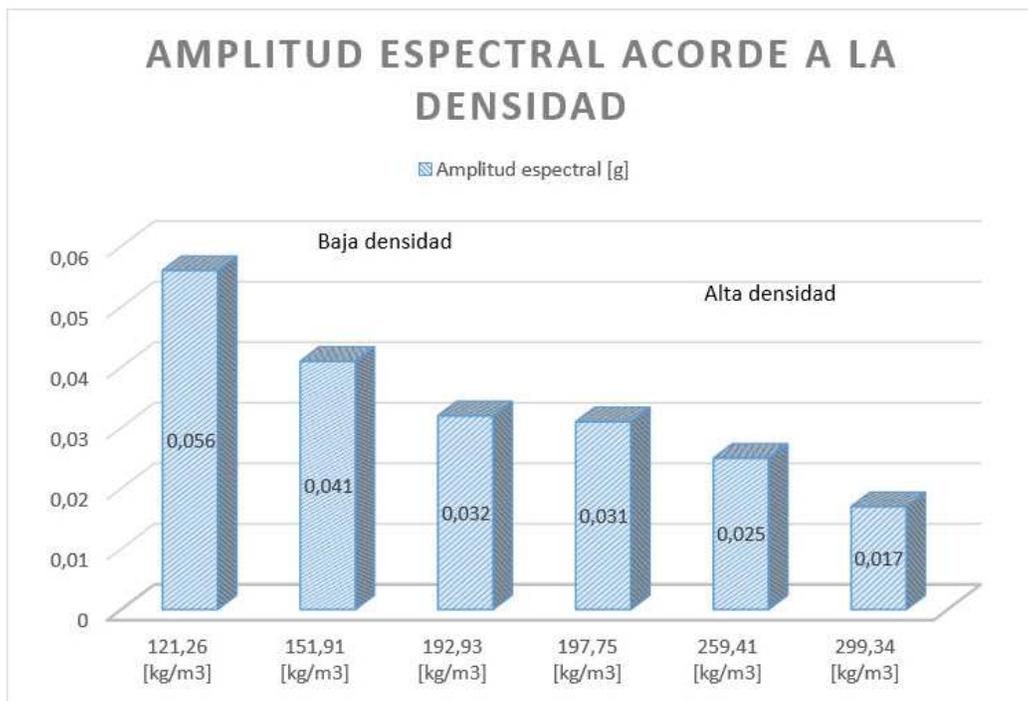


Figura 79: Amplitud espectral acorde a la densidad

Según las técnicas no destructivas utilizadas para obtener módulos de elasticidad dinámico. La técnica de vibración transversal en vigas, define al módulo obtenido como

MOE de flexión dinámica. Esta nomenclatura es necesaria ya que existe otra técnica utilizada baja ondas de esfuerzo el cual denomina al módulo obtenido como MOE longitudinal dinámico. En un estudio realizado por Ilic (2003) realiza una comparación entre dichas técnicas. Las frecuencias naturales de la viga se calculan según la ecuación 23 descrita en el capítulo 2.

$$\omega = \beta^2 * \sqrt{\frac{E * I}{\rho * A}} \quad (4.14)$$

$$\omega = (\beta * l)^2 * \sqrt{\frac{E * I}{\rho * A * l^4}} \quad (4.15)$$

Donde ω es la frecuencia angular de vibración. Y los coeficientes βl puede ser determinados por las condiciones límites (condiciones de frontera) y los diferentes modos de vibración de la viga.

Tabla 35

Condiciones límite para la vibración transversal de una viga con un extremo empotrado y un extremo libre

<p>Un extremo empotrado y el otro libre</p> 	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = -1$	$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x - \alpha_n (\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x)]$ donde $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n l + \sinh \beta_n l}{\cos \beta_n l + \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 1.875104$ $\beta_2 l = 4.694091$ $\beta_3 l = 7.854757$ $\beta_4 l = 10.995541$
---	---	---	---

Fuente: (Rao, Vibraciones Mecánicas, 2012)

El coeficiente $\beta_1 l$ (tabla 35) perteneciente al primer modo de vibración es igual a 1,875 que está determinado por las condiciones límites (condiciones de frontera).

En la tabla 36 descrita a continuación se detalla los datos adquiridos en la experimentación, se estableció para todos los ensayos una longitud de empotramiento de 7,5 [cm].

Tabla 36
MOE Dinámico vs Densidad Incremento porcentual

Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Primera Frecuencia [Hz]	Módulo Dinámico [Pa]	Incremento (%)
121,26	26,1	1.882.418.862,52	0%
135,83	28,1	2.630.520.235,88	40%
139,35	27,1	2.327.481.579,90	12%
140,91	27,08	2.366.968.550,47	2%
142,035	25,4	2.161.187.939,08	9%
146,59	27,9	2.794.228.875,19	29%
147,22	27,5	2.732.477.961,75	2%
147,73	27,3	2.610.359.550,20	4%
151,37	26,9	2.515.115.231,38	4%
151,91	25,8	2.430.047.649,52	3%
152,14	25,9	2.509.828.555,61	3%
152,53	27,3	2.793.672.130,02	11%
154,38	28,1	3.003.678.574,50	8%
161,59	28,67	3.042.522.187,78	1%
163,66	28,75	3.306.830.539,53	9%
167,85	26,8	2.837.789.432,59	14%
172,29	27,2	3.012.868.829,85	6%
179,56	27,4	3.170.234.809,10	5%
190,74	27,1	3.436.434.154,04	8%
192,93	29,3	4.076.670.764,86	19%

Continua...

Densidad ($\frac{kg}{m^3}$)	Primera Frecuencia [Hz]	Módulo Dinámico [Pa]	Incremento (%)
197,75	28	3.821.066.008,75	6%
207,65	29	4.203.418.253,13	10%
215,33	27,7	3.960.201.586,89	6%
223,65	27,5	4.085.307.169,10	3%
240,09	27,8	4.627.783.921,42	13%
250,79	27,5	4.553.041.927,65	2%
251,27	27,5	4.566.729.967,87	0%
257,09	28,7	5.299.134.228,53	16%
257,32	26,55	4.342.004.695,99	18%
259,41	28,42	5.160.599.795,45	19%
265,90	28,75	5.279.500.301,08	2%
268,67	27,67	4.978.443.077,11	6%
270,89	28,4	5.411.553.694,05	9%
271,99	29,92	6.013.117.596,07	11%
272,96	28,58	5.473.208.317,46	9%
273,12	28,9	5.634.698.713,28	3%
288,92	26,2	4.876.062.823,67	13%
291,81	28,1	5.725.984.268,42	17%
299,00	28,6	6.088.765.252,59	6%
299,34	28,8	6.104.301.789,82	0%
Promedio			9%

Como se puede observar en la tabla 36 el comportamiento de la frecuencia natural tiene una alta dispersión y no existe una tendencia ni correlación a medida que aumenta la densidad de la madera. En cuanto al MOE de Flexión Dinámica existe un incremento promedio del 9% entre cada probeta a mayor densidad.

4.10. Comparación MOE estático vs MOE dinámico

Mediante la experimentación se ha comparado el MOE Estático y MOE Dinámico de cada uno de las 40 probetas ensayadas tendiendo como un gráfico de dispersión como se muestra en la figura 80.

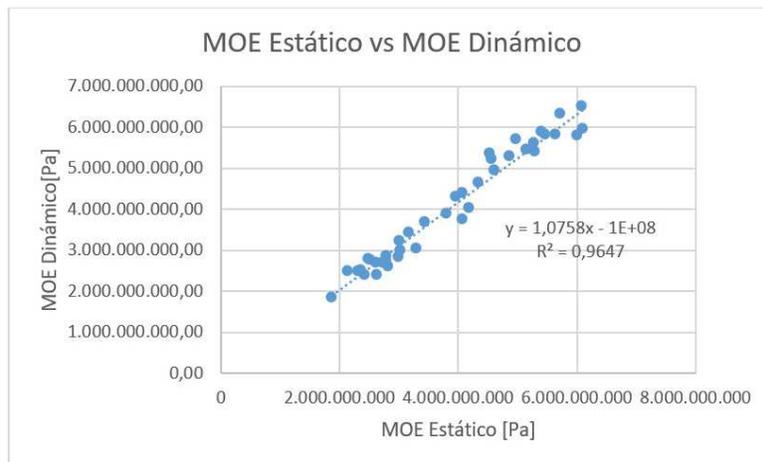


Figura 80: Gráfico MOE Estático vs MOE Dinámico

Como se puede apreciar en la figura 80 existe una alta correlación entre MOE Estático y MOE Dinámico obtenido en la experimentación de probetas de madera de balsa un valor de 96.47%, con una tendencia lineal. De estos dos resultados se puede determinar que el MOE Dinámico es muy semejante a obtener MOE Estático. Se ha comparado ambos resultados y se ha determinado un error promedio de 6.36% entre las dos técnicas descritas anteriormente.

En otros estudios Ilic (2001) comparo MOE Estático y MOE Dinámico en la experimentación en madera de Eucalipto, teniendo una alta correlación del 0,99. Se puede apreciar en la figura 81 el mismo comportamiento con la madera de balsa. Ilic identifica las correlaciones que existen entre MOE estático y MOE de flexión dinámico (obtenido de la técnica de vibración transversal), del mismo modo MOE estático con MOE longitudinal dinámico (utilizando la técnica de ondas de esfuerzo).

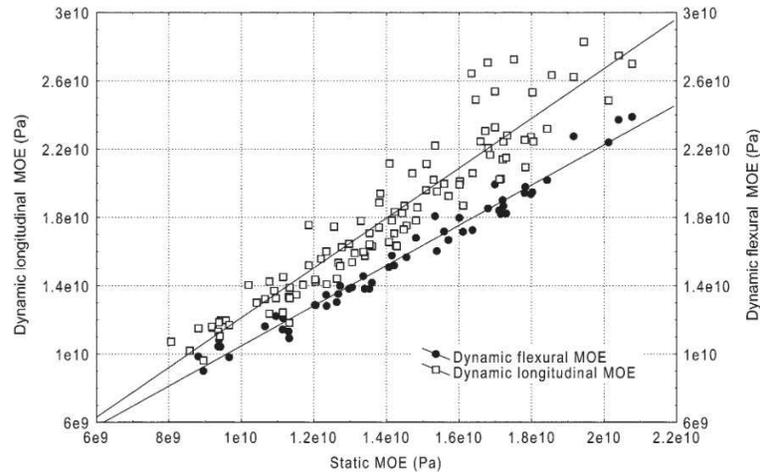


Figura 81: Gráfico relaciones entre MOE longitudinal (El) y de flexión dinámica (Ef) con MOE Estático
Fuente: (J.Ilic, 2001)

4.11. Análisis Dinámico en micro a macro estructura

Se ha realizado un esquema que permite comprender de una madera global todo el fenómeno de la experimentación, tomando en consideración desde un nivel micro a macro para determinar cuáles son las implicaciones que tiene los cambios en la microestructura de la madera de balsa en el comportamiento dinámico a continuación en la figura 82 se presenta un esquema de la visión global del estudio.

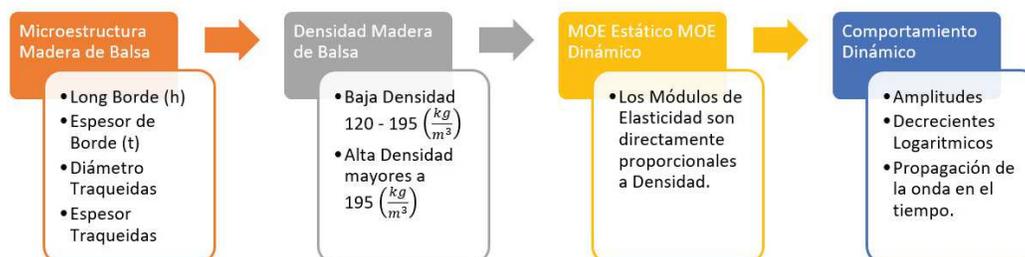


Figura 82: Esquema de la visión global del fenómeno de la experimentación

En la figura 83 se puede apreciar un resumen del análisis de la micrografía de madera

de balsa, se muestran la variación en cada una de las mediciones hechas en las células prismáticas y Traqueidas.

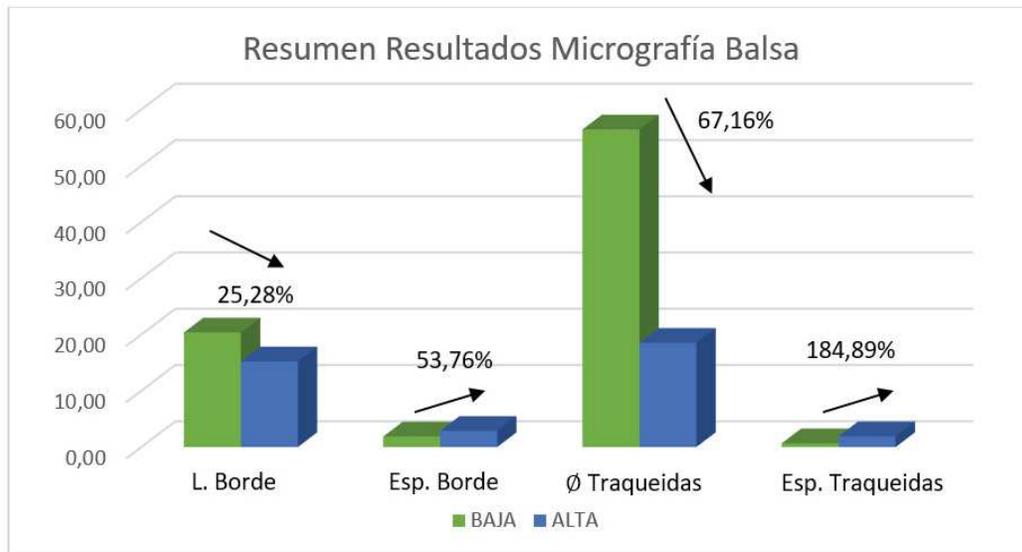


Figura 83: Resumen resultados Micrografía Balsa baja vs alta densidad

Cada una de las variables analizadas en la micrografía como Longitud de borde, espesor de la doble pared celular, diámetro y espesor de Traqueidas repercuten en el aumento del comportamiento dinámico presentado en la figura 84.

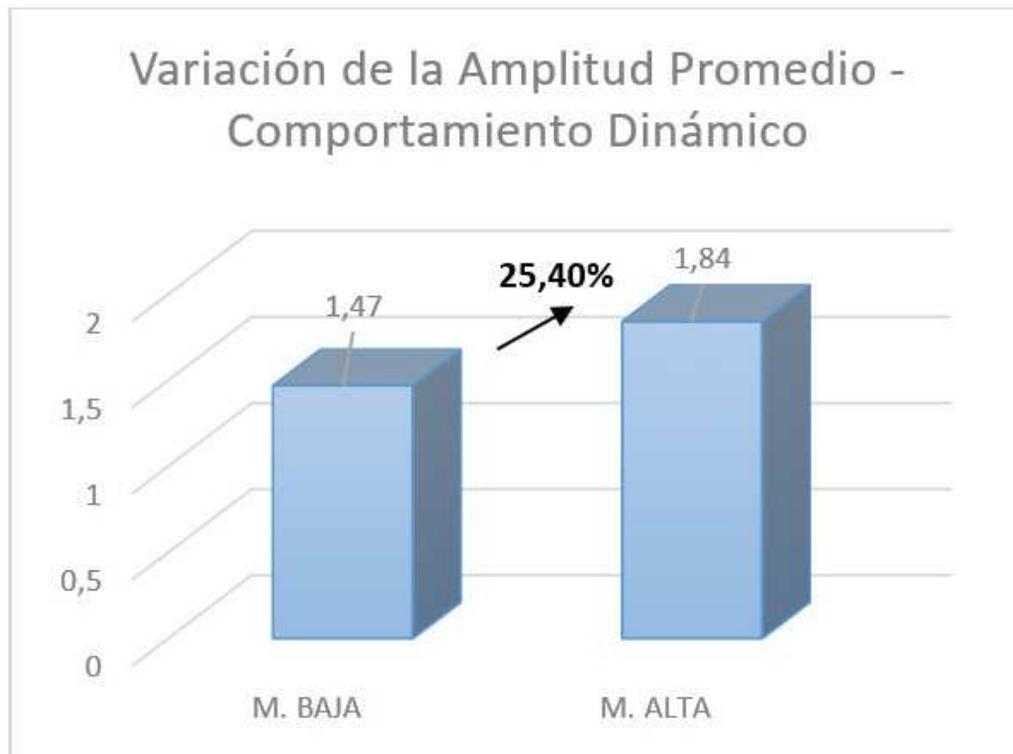


Figura 84: Variación de la Amplitud Promedio - Comportamiento Dinámico

Como se puede apreciar en las figuras 83 y 84, presentan cambios en la micro estructura con una disminución del 25,28% en longitud de lado de la celda y un aumento del 53,76% en el espesor de la doble pared celular, ha media que aumenta la densidad de la madera de balsa, las células prismáticas se reducen en diámetro en un 67,16% pero a su vez su concentración por unidad de área es mayor, lo que demuestra que existen una mayor cantidad de células prismáticas por región analizada. Estos cambios en la estructura celular se pueden apreciar en densidades que van desde 192,928 [kg/m³] a 259,409 [kg/m³] representando un incremento promedio de la amplitud de la aceleración del 25,4% transcurridos los 700 [ms].

Las células prismáticas disminuyen en diámetro, pero aumentan su espesor de doble pared influyendo en la energía de disipación del movimiento transversal que atenúa la propagación de la onda con una serie de pulsos igualmente espaciados cuya magnitud disminuye exponencialmente en el tiempo. A su vez, la amplitud espectral disminuye a

mayor espesor de doble pared de las células prismáticas. En cuanto a la frecuencia de resonancia existe variabilidad ya que es una propiedad intrínseca de cada viga y está estrechamente relacionada con la microestructura.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los valores del MOE estático y Coeficiente de Elasticidad en flexión, depende estrechamente del valor de la densidad ya que se puede concluir que dichos valores son directamente proporcionales a la densidad de la madera de balsa. Se estableció que para un rango de densidad desde 120 kg/m³ a 300 kg/m³ el MOE estático se encuentra en un rango de 1,84 [GPa] a 5,96 [GPa] y un coeficiente de Elasticidad tomado en el plano longitudinal desde 110,8 [KN/m] hasta 356,25 [KN/m].
- Aplicando las técnicas de vibración transversal para la obtención del MOE Dinámico a Flexión se pudo observar que la frecuencia de resonancia no tiene una correlación ni tendencia en el comportamiento del MOE Dinámico se ha determinado con un histograma que dicha frecuencia de resonancia se encuentra con un valor predominante en un rango de 26,5 a 29,5 Hz. Se ha encontrado nuevamente que la variación en la densidad de las probetas influye directamente sobre el MOE Dinámico de Flexión.
- Se determinó que existe una alta correlación entre los dos métodos para obtener Módulos de Elasticidad, una mediante ensayos estáticos (ED) y la otra mediante la

técnica de vibración transversal en vigas (END). Teniendo un valor de correlación de 96,47 % y un error promedio entre los dos métodos de 6,36 %.

- Existe una amplia variabilidad entre los resultados obtenidos en el presente estudio en comparación con la investigación de Borregas (2015). Los estudios han llegado a las mismas premisas con respecto a la longitud del lado de celda, disminuye al aumentar la densidad de balsa. El grosor de la doble pared celular disminuye conforme baja su densidad. Esta diferenciación es ocasionada por las condiciones meteorológicas y medioambientales del lugar geográfico donde se produce la madera de balsa, además de considerar la anisotropía de la madera a lo largo del tronco.
- A medida que las células prismáticas disminuyen en longitud del lado del polígono irregular y diámetro de Traqueidas, aumenta el espesor de doble pared, contribuyendo en el aumento de su densidad, incidiendo sobre su capacidad de absorción de energía, influye directamente en la disipación del movimiento transversal que atenúa la propagación de la onda con una serie de pulsos igualmente espaciados cuya magnitud disminuye exponencialmente en el tiempo alrededor de un 25,4%. En cuanto a la amplitud espectral disminuye a mayor espesor de doble pared de las células prismáticas, la frecuencia de resonancia es una propiedad intrínseca de cada viga y está estrechamente relacionada con la microestructura proporcionando una variabilidad entre cada espécimen con similares características.
- Se concluye que el método de la caracterización dinámica a través de técnicas de vibración transversal en probetas de madera de balsa con disposición de empotramiento y extremo libre sometido a una fuerza de impacto para determinar sus frecuencias de resonancia o natural son adecuadas para obtener módulos de elasticidad como una técnica no destructiva.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que para la obtención del MOE Estático se siga el procedimiento de la norma D 143 – 14, para tener un resultado confiable y valido adecuado para

la comparación de resultados.

- Se recomienda que para obtener MOE Dinámico de flexión siguiendo la técnica de vibración transversal en vigas, es necesario que el equipo sea completamente aislado de cualquier perturbación externa que cause ruido a las lecturas de los instrumentos. Es por ello que la máquina ha sido colocada sobre una base de una mesa de mármol, separando el sistema de fuerza con el sistema de sujeción.
- Es necesario realizar con certeza las dimensiones de las probetas estudiadas, tanto ancho, largo y profundidad. La precisión de las medidas, garantizan un correcto MOE Dinámico ya que en su ecuación existe valores de espesor al cuadrado y longitud de empotramiento de exponentes a la cuarta potencia.
- Al momento de realizar las comparaciones entre madera de balsa producida en una zona geográfica específica, tener en cuenta las condiciones medioambientales y meteorológicas ya que influye en el crecimiento y por ende la microestructura.
- Es fundamental realizar un procedimiento adecuado para la preparación de las probetas para la visualización en el microscopio de Barrido. La cizalla debe realizarse de manera rápida y precisa con una hoja de afeitar y el proceso de secado debe ser al ambiente durante 24 horas.
- Se recomienda realizar la caracterización bajo otra técnica no destructiva para maderas conocida como “Ondas de Esfuerzo”. La literatura señala que es un método con mayor aplicabilidad in situ, fáciles de usar y bajos costos de equipo.

Capítulo 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson s, serimaa r, paakkari t, saranpää p, & pesonen e. (2003). crystallinity of wood and the size of cellulose crystallites in norway spruce (picea abies). j wood sci.
- Andersson s, serimaa r, tokkeli m, paakkari t, saranpää p,, & pesonen e. (2000). microfibril angle of norway spruce (picea abies (l.) karst.) compression wood: comparison of measuring techniques. j wood sci.
- Bergander a, & salmén l. (2002). cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers. j mater sci.
- Ecuadorforestal. (25 de septiembre de 2012). ecuador forestal. obtenido de <http://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-7-balsa/>
- Ilic, j. (2003). dynamic moe of 55 species using small wood beams. springer-verlag.
- J.ilic. (2001). relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry eucalyptus delegatensis r.baker. springer-verlag.
- Khalifa, a., & barbero, e. (2015). caracterización dinámica mediante barra hopkinson de materiales cerámicos monolíticos y compuestos. madrid, leganés, españa: boletín de la sociedad española de artículos cerámicos y vidrio.

- Kolsky, h. (1963). new york: dover publications, inc.
- Kotlarewski, n., belleville, b., gusamo, b., & ozarska, b. (2015). mechanical properties of papua new guinea balsa wood. springer-verlag berlin heidelberg.
- La place. (2014). obtenido de departamento de física aplicada - universidad de sevilla: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/oscilaciones_amortiguadas_\(gie\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/oscilaciones_amortiguadas_(gie))
- M. b., p. a., r. s., & l. g. (2015). composition and structure of balsa (ochroma pyramidale) wood. finland: springer-verlag berlin heidelberg 2015.
- National, Instruments. (24 de enero de 2017). national instruments. obtenido de www.ni.com.
- NCH173of.74. (2013). Estructuras en madera. en norma chilena de la construcción. chile.
- Necsemd. (2014). norma ecuatoriana de la construcción . en estructuras de madera (págs. 8-12). quito: dirección de comunicación social, miduvi.
- Proecuador. (2013). boletín de análisis de mercados internacionales. ecuador.
- R. r., & r. p. (s.f.). non destructive testing for assessing wood members in structures. general technical report fpl-gtr-70. united states.
- Rao, s. s. (2007). vibration of continuous systems. miami, florida: john wiley & sons, inc.
- Rao, s. s. (2012). vibraciones mecánicas. pearson.
- Revista española de cardiología. (2007). revista española de cardiología. obtenido de <http://www.revespcardiol.org/es/influencia-del-tipo-registro-unipolar/articulo/13111238/>
- Ruiz, a., garcia, f., & noguera, j. (2010). guia practica de sensores. españa.
- Silva, a. d., & kyriakides, s. (2007). compressive response and failure of balsa wood. compressive response and failure of balsa wood. ustin, estados unidos.

- Sinais. (s.f.). sinais. obtenido de http://www.sinais.es/recursos/curso-vibraciones/resonancia/introduccion_resonancia.html.
- Troncoso, j. c., & palma, r. b. (2009). evolution of the longitudinal modulus of elasticity between 10° c and 100° c in specimens of pinus radiata using a nondestructive evaluation technique. chile: facultad de ciencias forestales. universidad de talca, talca. chile.
- Ujaen. (2005). obtenido de http://www4.ujaen.es/~jalmira/transformada_fourier_almira.pdf.