



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, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE
ABSORCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA, CONDUCTIVIDAD
TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE TABLEROS
ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO DE
BALSA”

AUTORES: BALSECA VIZUETE, ERNESTO SEBASTIÁN

CAGUANA CAIZA, CARLOS DAVID

DIRECTOR: ING. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO MSC.

SANGOLQUÍ

2020



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 DE LAS PROPIEDADES DE ABSORCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO DE BALSA*” fue realizado por el señor **Balseca Vizúete, Ernesto Sebastián y Caguana Caiza, Carlos David** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de enero de 2020



Ing. Pérez Rosales José Emilio, Msc.

C.C. 1706481957



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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Balseca Vizuete, Ernesto Sebastián y Caguana Caiza, Carlos David*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ABSORCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO DE Balsa”*** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 20 de enero de 2020

Sr. Balseca Vizuete Ernesto Sebastián

C.C.: 1719209254

Sr. Caguana Caiza Carlos David

CC.: 1719834895



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, *Balseca Vizuite, Ernesto Sebastián y Caguana Caiza, Carlos David*, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE ABSORCIÓN Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y COMPORTAMIENTO AL FUEGO DE TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO DE Balsa”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de enero de 2020

Sr. Balseca Vizuite Ernesto Sebastián

C.C.: 1719209254

Sr. Caguana Caiza Carlos David

CC.: 1719834895

DEDICATORIA

A mis Padres Ernesto y Silvia, a mis hermanas Verito y Rouse, a mi compañera fiel Vane y a mi hijo Mateo, les adoro con mi alma.

Sebastián Balseca

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y todo el esfuerzo que requerí para realizarlo a MARÍA CONCEPCIÓN PANCHI MAILA, el más hermoso ángel que pisó la tierra y que ahora está en cielo, quien me dio todo lo que puedo llamar valioso en la vida, me dio a mi madre Sonia, un ser único en el mundo quien me brindó a mi hermana Yessenia la persona con un alma tan pura, las 3 son mi vida, son mi esencia, a quienes debo todo lo bueno que pueda hallarse en mi ser. Lo único que puedo hacer es agradecer a Dios, agradecer a todos los Dioses que hay o que hubo o que habrá el regalo de compartir contigo Conchita 25 años de mi vida y pedirle al universo todo el tiempo que le sea posible brindarme junto a mi madre y mi hermana, porque las amo y las amaré hasta el final de los tiempos.

Carlos Caguana

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen de la Merced, por su ayuda y bendición en todo momento, a mis padres Ernesto y Silvia por su perseverancia, comprensión y amor, los cuales, fueron fundamentales para cumplir con este objetivo, más que un logro mío, es el de ustedes mis padres amados.

A Verito y Rouse, mis hermanas por su ejemplo, consejo y afecto, a Vanessa a quien le debo horas inagotables de estudio, además de ser fuente de amor sincero.

Andrés, André, Santo, Eddy, Luís, Cristhian, Iván, William y muchos amigos más, con los cuales compartí clases y muchos momentos gratos, gracias por su valiosa amistad.

Al Ingeniero José Pérez y Cristian Narváez por su confianza, guía y apoyo en el proyecto

Además, agradezco a quienes de una forma u otra colaboraron para que este proyecto sea desarrollado.

Sebastián Balseca

AGRADECIMIENTO

A Dios por la sabiduría y constancia para culminar mis estudios y realizar este trabajo.

A mi madre y hermana por el constante apoyo durante toda mi vida, sin su ayuda este logro no hubiera sido posible.

Al ingeniero José Pérez por la guía para la realización de este trabajo.

Al ingeniero Christian Narváez por la confianza depositada en nosotros.

Finalmente, un agradecimiento inmenso a cada persona que a través de mi carrera universitaria me brindó una palabra de aliento.

Carlos Caguana

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
AGRADECIMIENTO.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
Listado de símbolos.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPITULO I GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia.....	3
1.3. Área de influencia	4
1.4. Alcance del Proyecto	5
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	6
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Estructura tipo sándwich.....	7
2.1.1. Núcleo	8
2.1.2. Caras.....	9
2.2. Bambú	9
2.3. Balsa.....	11
2.4. Fatiga.....	12
2.4.1. ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure	15
2.5. Vibración.....	16
2.6. Transferencia de calor	19
2.6.1. Conductividad térmica	21
2.6.2. Conducción unidimensional.....	21
2.6.3. Coeficiente de Conductividad térmica de un material	21
2.6.4. ASTM C177-13 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.....	21
2.7. Coeficiente de Absorción de Energía Acústica.....	24
2.7.1. SAC.....	24
2.7.2. Bandas de octava.....	25

2.7.3.	Tubo de Kundt	26
2.7.4.	Método de función de transferencia.....	26
2.7.5.	ASTM 1050 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.	27
2.8.	Comportamiento al fuego.....	28
2.8.1.	Incendio.....	28
2.8.2.	Comportamiento al fuego de estructuras y sus materiales	28
2.8.3.	Comportamiento al fuego de la madera	30
2.8.4.	Protección de la madera frente al fuego.....	30
2.8.5.	ASTM E2707- 15 Standard Test Method for Determining Fire Penetration of Exterior Wall Assemblies Using a Direct Flame Impingement Exposure.....	31
CAPITULO III ENSAYOS.....		33
3.1.	Ensayo a Flexión	36
3.1.1.	Ensayo a Flexión Estático	36
3.1.2.	Cálculo del Módulo de Elasticidad Equivalente	40
3.1.2.1.	Moduló de elasticidad de las caras de bambú:	41
3.1.2.2.	Módulo de elasticidad del núcleo de balsa:	42
3.1.2.3.	Cálculo de Módulo de Elasticidad Prototipo 1	43
3.1.2.4.	Cálculo del Módulo de Elasticidad Prototipo 2	44
3.1.3.	Ensayo de flexión a fatiga.....	45
3.1.3.1.	Preparación de muestras.....	46
3.1.3.2.	Desarrollo del ensayo.....	47
3.1.3.3.	Resultados	49
3.2.	Ensayo de Vibración Transversal en viga cantiléver	55
3.2.2.	Preparación de muestras.....	56
3.2.3.	Desarrollo del ensayo.....	56
3.2.4.	Resultados	58
3.3.	Ensayo de Conductividad Térmica	64
3.3.2.	Preparación de Muestras	65
3.3.3.	Desarrollo del Ensayo	65
3.3.4.	Resultados	67
3.4.	Ensayo de Coeficiente de Absorción de Energía Acústica	68
3.4.2.	Preparación de muestras.....	68
3.4.3.	Desarrollo del Ensayo	69
3.4.4.	Resultados	70
3.5.	Ensayo de Comportamiento al Fuego	72
3.5.2.	Preparación de muestras.....	72
3.5.3.	Desarrollo del Ensayo	74
3.5.4.	Resultados	76
CAPITULO IV ANALISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS		83
4.1.	Ensayo de Fatiga	83
4.1.2.	Análisis.....	83

4.1.3.	Comparación	86
4.2.	Ensayo de Vibración Transversal en Viga Cantiléver	86
4.2.2.	Análisis.....	86
4.3.	Ensayo de Conductividad Térmica	87
4.3.2.	Análisis.....	87
4.3.3.	Comparación	90
4.4.	Ensayo de Absorción de energía sonora	91
4.4.2.	Análisis.....	91
4.4.3.	Comparación	91
4.5.	Ensayo de Comportamiento al Fuego	92
4.5.2.	Análisis.....	92
4.5.3.	Comparación	94
5.	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1.	Conclusiones	96
5.2.	Recomendaciones.....	97
6.	REFERENCIAS.....	98
Anexos	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Falla por volcamiento de mampostería después del terremoto del 16 de abril de 2016.	1
Figura 2. Rotura y Rajadura de mampostería de bloque edificio Fortaleza.....	2
Figura 3. Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño	4
Figura 4. Estructura tipo sándwich.....	7
Figura 5. Tipos de núcleos	8
Figura 6. Fractura de un panel tipo sándwich sometido a fatiga al 90%	13
Figura 7. Ciclo de histéresis	14
Figura 8. Configuración de ensayo a) Estándar o de 3 puntos y b) No estándar o de 4 puntos...	15
Figura 9. Esquema de ensayo de vibración	17
Figura 10. Curvas de corrección de frecuencia.....	18
Figura 11. Modos de Vibración	19
Figura 12. Tipos de transferencia de Calor	20
Figura 13. Esquema idealizado de flujos de calor.....	23
Figura 14. Tipos de Energía sonora	24
Figura 15. Disposición de tubo de Kundt para medir la impedancia	26
Figura 16. Disposición de tubo de Kundt para medir la impedancia con función de transferencia	27
Figura 17. Clasificación del fuego	29
Figura 18. Estabilidad al fuego de varios materiales.	31
Figura 19. Embarque de las caras de bambú.....	33
Figura 20. Distribución del poliuretano líquido en la cara superior de bambú.....	34
Figura 21. Prensado de Tableros.....	35
Figura 22. Embarque de los tableros para su posterior traslado	36
Figura 23. Simulación elaborada para el accesorio de soporte	37
Figura 24. Medidas de las muestras para ensayo estático a) prototipo 1 y b) prototipo 2	38
Figura 25. Graficas Fuerza-Desplazamiento a) Prototipo 1 y b) Prototipo 2.....	39
Figura 26. Marcas de puntos de carga y apoyo.....	40
Figura 27. Diagrama Fuerza-Desplazamiento para el Bambú	41
Figura 28. Diagrama-Desplazamiento para la Balsa.....	42
Figura 29. Idealización de viga compuesta de un material sándwich	43
Figura 30. Gráfico Fuerza-Desplazamiento Prototipo 1	44
Figura 31. Gráfico Fuerza-Desplazamiento Prototipo 2	45
Figura 32. Ensayo de Fatiga en 4 puntos	46
Figura 33. Identificación de muestras a fatiga	47
Figura 34. Esquema del efecto de la masa de accesorio	49
Figura 35. Lazo de histéresis prototipo 1 a)55% b) 70% y c) 90%	51
Figura 36. Lazo de histéresis prototipo 2 a)55% b) 70% y c) 90%	52
Figura 37. Método de integración trapezoidal para cálculo de áreas dentro la curva.....	53
Figura 38. Gráfico S-n prototipo 2.....	55
Figura 39. Ensayo de Vibración Transversal	55
Figura 40. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-1 a) excitación de caída de peso y b) con excitación de golpe.....	59

Figura 41. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-2 con a) excitación de caída de peso y b) excitación de golpe	60
Figura 42. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-3 con a) excitación de caída de peso y b) con excitación de golpe.....	61
Figura 43. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-5 con a) excitación de caída de peso y b) excitación de golpe	62
Figura 44. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista lateral izquierda.....	63
Figura 45. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista lateral derecha	63
Figura 46. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista superior	64
Figura 47. Ensayo de Coeficiente de Conducción	64
Figura 48. Ensayo de Coeficiente de absorción de energía acústica.....	68
Figura 49. Muestras con identificación para ensayo acústico.....	69
Figura 50. Gráfico SAC – Frecuencia a) muestra PB2-S-1 y b) PB2-S-2	72
Figura 51. Ensayo de Comportamiento al Fuego.....	73
Figura 52. A la izquierda tablero con recubrimiento ignífugo y a la derecha tablero en condiciones normales.	74
Figura 53. Puntos en donde se tomaron las temperaturas durante el ensayo	75
Figura 54. Evolución de la temperatura en la cara no expuesta de la muestra con protección ignífuga respecto al tiempo	77
Figura 55. Evolución de la temperatura en la cara no expuesta de la muestra sin protección ignífuga respecto al tiempo	78
Figura 56. Presencia de llama por la combustión propia del tablero estructural en muestra PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha).	79
Figura 57. Cara expuesta al fuego de las muestras PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha) culminado el ensayo	79
Figura 58. Cara posterior de las muestras PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha) culminado el ensayo	80
Figura 59. Medidas máximas de la zona de afectación producida por la llama.....	80
Figura 60. Comportamiento del recubrimiento ignífugo frente a la llama	81
Figura 61. Esquema de puntos para medición de profundidad	81
Figura 62. Aumento gradual de fuerza producida por la máquina.....	83
Figura 63. Falla por cortante en el núcleo	84
Figura 64. Falla por cortante capa intermedia de las caras	84
Figura 65. Deslizamiento entre el núcleo y las caras por falta de presión y adhesión.....	85
Figura 66. Mapa de zonas climáticas del Ecuador	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de la relación d/c	36
Tabla 2 Fuerzas y desplazamientos máximos en ensayo estático prototipo 1 y 2.....	40
Tabla 3 Medidas de las muestras para el ensayo de Fatiga	48
Tabla 4 Valores de energía disipada y factor de pérdida	54
Tabla 5 Número de ciclos resistidos por las muestras prototipos 1 y 2	54
Tabla 6 Medidas de muestras ensayo de vibración	56
Tabla 7 Factor de corrección	57
Tabla 8 Frecuencias y variación	58
Tabla 9 Medidas de las muestras ensayo de conducción térmica	65
Tabla 10 Coeficiente de conductividad térmica y resistencia térmica	67
Tabla 11 Medidas de las muestras para sonido	69
Tabla 12 Promedio del Coeficiente de Absorción de Sonido en Banda de 1/3 de Octava:	70
Tabla 13 Dimensiones de las muestras.....	74
Tabla 14 Datos de tiempo y temperatura en puntos de control muestra PB2-FG-1	76
Tabla 15 Datos de tiempo y temperatura en puntos de control muestra PB2-FG-2.....	77
Tabla 16 Coordenadas de puntos para medición de profundidad	82
Tabla 17 Coeficiente de conductividad de materiales aislantes	87
Tabla 18 Requisitos de envolvente para zona climática 1.....	89
Tabla 19 Requisitos de envolvente para zona climática 6.....	90
Tabla 20 Aumento porcentual del valor R mínimo requerido.....	90
Tabla 21 Coeficiente de conductividad para materiales típicos de mampostería.....	91
Tabla 22 SAC de materiales comunes de mampostería	91
Tabla 23 Peso de las muestras antes y después de la elaboración del ensayo.....	94
Tabla 24 Comportamiento presentado por las muestras	94

Listado de símbolos

E_p : Energía potencial [J]

E_r : Energía elástica [J]

E_d : Energía disipada [J]

η : Factor de pérdida

d : Espesor de caras [mm]

l : Longitud entre apoyos [mm]

l_i : Longitud libre de viga cantiléver [mm]

c : Espesor del núcleo [mm]

Q : Flujo de calor [W]

Q_T : Flujo de calor total [W]

A : Área de la sección del transversal [m²]

λ : Coeficiente de conductividad térmica en [W/m K]

R_p : Resistencia de placa caliente [Ω]

P : Potencia eléctrica [W]

t : Espesor de tablero sándwich

ΔT : Diferencia de temperatura [K]

A_s : Área perpendicular al flujo de calor [m²]

R : Resistencia térmica [m² K/W]

w : Ancho de la probeta [mm]

F : Fuerza media aplicada en el ensayo [N]

δ : Desplazamiento [mm]

E : Módulo de Elasticidad [GPa]

E_B : Módulo de Elasticidad del Bambú [GPa]

E_{Ba} : Módulo de Elasticidad de la Balsa [GPa]

Z : Factor de equivalencia.

I_{EB} : Inercia equivalente de bambú [mm⁴]

a : Distancia entre el punto de carga y el punto de apoyo [mm]

RESUMEN

Se fabricó y caracterizó prototipos de tablero estructural tipo sándwich de espesor 74 mm y 124 mm con caras de bambú y núcleo. Se realizó 5 tipos de ensayos referenciados en estándares ASTM, para determinar propiedades de flexión a fatiga, vibración, conductividad térmica, coeficiente de absorción de energía acústica y comportamiento al fuego, para lo cual, se necesitó de 2 tableros estructurales de 74 mm de espesor y 5 de 124 mm para dar un total de 30 muestras. Como resultado se obtuvo que, el tablero estructural con espesor de 124 mm presenta mejores propiedades de flexión a fatiga y fue el referente para el resto de ensayos, a excepción del ensayo de vibración, el cual, por motivos de elaboración y manejo de muestras al momento de realizar el ensayo, se lo desarrolló con el de menor espesor. Las propiedades de flexión a fatiga, vibración y coeficiente de conducción obtenidas dejan al tablero estructural por encima de la mampostería tradicional en absorción de energía acústica presenta características similares; sin embargo, frente al fuego, las muestras no presentan el mismo comportamiento que la mampostería tradicional, siendo esta propiedad, su única desventaja.

PALABRAS CLAVES

- **CICLO DE HISTÉRESIS**
- **COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**
- **COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA ACÚSTICA**
- **TABLERO ESTRUCTURAL TIPO SANDWICH**
- **IGNÍFUGO**

ABSTRACT

Prototypes of structural sandwich of 74 mm and 124 mm thickness with bamboo skins and balsa core were manufactured and characterized. Five types of tests referenced in ASTM standards were carried out to determine fatigue four-point bending properties, vibration, thermal conductivity, acoustic energy absorption coefficient and fire behavior. Two 74 mm thick and five 124 mm thick structural sandwich were required to give a total of 30 specimens. As a result, the structural sandwich with a thickness of 124 mm showed better fatigue bending properties and was the reference for the rest of the tests, except for the vibration test, for reasons of specimens preparation and handling at the time of the test, was developed with the thinnest one. The structural sandwich presents better properties of fatigue bending, vibration and conduction coefficient than traditional masonry, in absorption of acoustic energy presents similar characteristics; however, front of fire, the specimens don't present the same behavior as the traditional masonry, this property is its only disadvantage.

KEYWORDS

- **HYSTERESIS CYCLE**
- **COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY**
- **SOUND ABSORPTION COEFFICIENT**
- **SANDWICH STRUCTURE**
- **IGNIFUGE**

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, a través del Centro de Posgrados, juntamente con el apoyo de la empresa 3A Composites han llevado a cabo la elaboración de prototipos de tableros estructurales compuestos tipo sándwich con núcleo de balsa y 2 propuestas de materiales para sus caras, bambú y melina, con diferentes espesores para su núcleo. El origen de su investigación surge de los problemas evidenciados en la mampostería tradicional como consecuencia del evento sísmico suscitado en la costa ecuatoriana el 16 de abril de 2016 entre las provincias de Esmeraldas y Manabí. El mayor problema ocurre en componentes con un centro de gravedad alto, como paneles eléctricos, estanterías y mampostería, los cuales son susceptibles al problema de volcamiento como se muestra en la **Figura 1**, representando un gran peligro para personas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2011),.



Figura 1. Falla por volcamiento de mampostería después del terremoto del 16 de abril de 2016

Fuente: (El Comercio, 2016)

Otra patología detectada fue la rotura y rajadura de mampostería construidas por bloques (Aguiar, Del Castillo, Mizobe, & Mendoza, 2016) como se muestra en la **Figura 2**.



Figura 2. Rotura y Rajadura de mampostería de bloque edificio Fortaleza
Fuente: (Aguiar, Del Castillo, Mizobe, & Mendoza, 2016)

En la primera propuesta se tiene la opción de núcleo de balsa con dos caras de bambú los cuales son unidos con poliuretano a 170 psi por 30 minutos de los cuales se obtuvieron 2 prototipos, con espesores de 124.3 mm y de 74 mm, con la única variante del espesor de núcleo de balsa. El largo y el ancho del tablero permanece constante con medidas de 1200 x 600 mm respectivamente.

La segunda propuesta consiste en un núcleo de balsa con dos caras de melina los cuales son unidos con poliuretano a 234 bar por 35 minutos de los cuales se obtuvieron 2 prototipos, el primero cuenta con 7 láminas cruzadas de melina, y el prototipo 2 tiene 14 láminas cruzadas de melina, con espesores totales de 77.4 mm y 156 mm respectivamente. El largo y ancho del tablero son constantes con medidas de 1200 x 600 mm respectivamente.

A estos 4 prototipos se los sometió a ensayos realizados en laboratorio destinados a encontrar una característica mecánica específica, misma que no puede dejarse de lado al momento de caracterizar completamente el tablero estructural tipo sándwich. (García & Barrigas, 2019). Para la caracterización mecánica, los ensayos realizados se basaron en los estándares: ASTM C364 para resistencia a la compresión de construcciones tipo sándwich, ASTM C393 para el ensayo de

propiedades de cizallamiento del núcleo de construcciones sándwich por viga a flexión, ASTM C273 para el ensayo de propiedades de corte de materiales de núcleo de sándwich, ASTM C297 para el ensayo de resistencia a la tracción plana de construcciones sándwich.

Los estudios desarrollados dejan como resultados las propiedades estáticas de los prototipos por lo cual el estudio del comportamiento dinámicos quedó para estudios futuros.

1.2. Justificación e importancia

La creciente contaminación causada por el constante y paulatino uso de materiales derivados de petróleo ha convertido en tema de interés la investigación de materiales compuestos orgánicos amigables con el medio ambiente (Monti, El Mahi, Jendill, & Guillaumat, 2018), donde las estructuras tipo sándwich han ganado espacio en aplicaciones industriales como aeronáutica, transporte, energía, construcción, etc. Las estructuras tipo sándwich han tenido como material del núcleo común al poliuretano o polietileno. Nuevas investigaciones en este tipo de estructuras se han enfocado en reemplazar los materiales del núcleo por materiales biológicos para crear una alternativa biodegradable manteniendo o mejorando sus propiedades, es por esta razón, que el uso de madera de balsa como material para el núcleo en estructuras sándwich, ha ido en aumento en los últimos años, siendo de gran importancia para la economía nacional ya que Ecuador es el mayor exportador de balsa en el mundo (Parra, 2016), como también productor de la madera de bambú, es por este motivo, la gran importancia de la aplicabilidad de estas maderas en el sector de la construcción como alternativa a la mampostería tradicional, logrando de esta manera dar un valor agregado a la materia prima y de esta forma contribuyendo con el desarrollo industrial del país.

En los trabajos de (Andino, 2019) y (García & Barrigas, 2019) se caracterizaron las propiedades estáticas de los tableros estructurales tipo sándwich; sin embargo, debido a la proyección de uso en zonas sísmicas del Ecuador, es necesario conocer la capacidad de absorción y disipación de energía

que conjuntamente con la conductividad térmica y respuesta al fuego, estas propiedades son imperantes para la total caracterización del tablero estructural tipo sándwich.

1.3. Área de influencia

Todo el territorio ecuatoriano presenta una amenaza sísmica alta, con excepción del nororiente conformado por las provincias de Sucumbíos, Napo y Orellana con una amenaza sísmica intermedia (zona verde) y el litoral ecuatoriano conformado por las provincias de Esmeraldas, Manabí y Guayas con una amenaza muy alta (zona roja) como se indica en la **Figura 3** (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014).

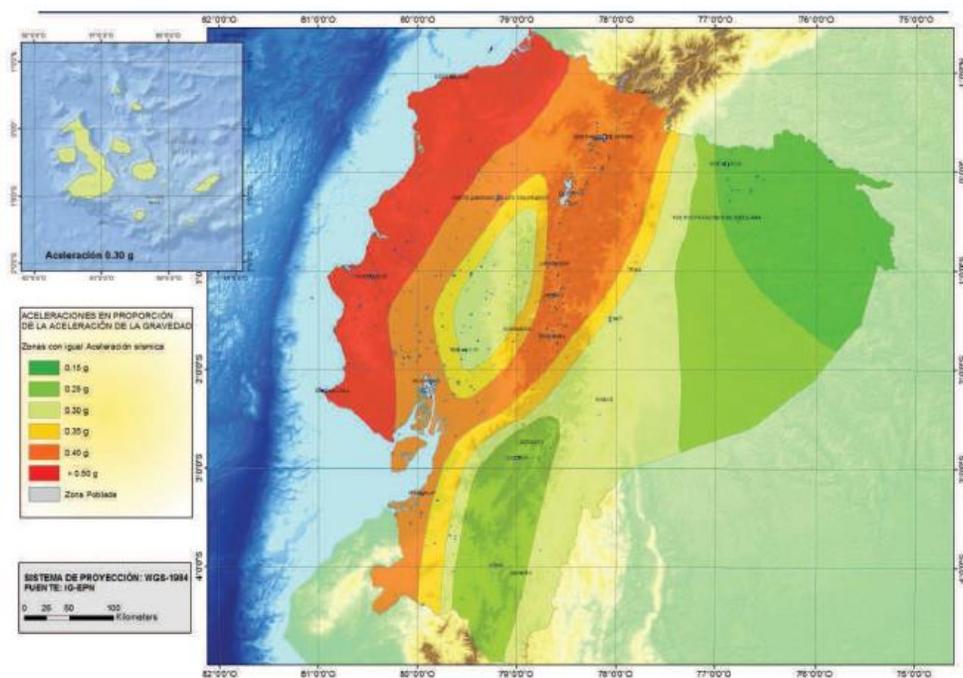


Figura 3. Ecuador, zonas sísmicas para propósito de diseño

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

Se verán influenciadas 3 áreas:

- La industria de la construcción, que convencionalmente utiliza materiales para mampostería con mal comportamiento ante un evento sísmico, se volverá más segura al sustituir dichos materiales por la alternativa de tablero estructural tipo sándwich.

- El sector industrial maderero, debido a que los elementos que constituyen los tableros estructurales tipo sándwich (bambú y balsa) son producidos en el país, lo cual impulsará fuentes de trabajo e investigación.
- Se mitigarán los daños al medio ambiente producidos por el uso de materiales tradicionales en la construcción, mediante el cambio a alternativas biodegradables como el tablero estructural propuesto cuyos componentes son explotados de una forma controlada, responsable y sostenible.

1.4. Alcance del Proyecto

La presente investigación plantea hallar las propiedades de absorción y disipación de energía, conductividad térmica y comportamiento al fuego, como segunda fase de caracterización de tableros estructurales compuestos tipo sándwich con núcleo de balsa, como alternativa de mampostería usado en la industria de la construcción convencional en zonas de alto riesgo sísmico del Ecuador.

Se realizará un análisis comparativo cualitativo-cuantitativo de las propiedades encontrada de los tableros, objeto de este estudio, y los materiales convencionales usados como mampostería en la industria de la construcción del Ecuador.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Caracterizar las propiedades de absorción y disipación de energía, conductividad térmica y comportamiento al fuego de tableros estructurales tipo sándwich con núcleo de balsa como alternativa de mampostería no convencional para construcciones en regiones de alto riesgo sísmico en Ecuador.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades de absorción y disipación de energía de los tableros estructurales tipo sándwich referenciados en los estándares ASTM E1050 y ASTM C393.
- Determinar el coeficiente de conductividad térmica del tablero estructural tipo sándwich referenciados en la norma ASTM C177.
- Determinar y comparar el comportamiento al fuego del tablero estructural tipo sándwich sin protección y con protección ignífuga referenciados e la norma ASTM E2707.
- Comparar cualitativa o cuantitativamente las propiedades obtenidas de los tableros estructurales tipo sándwich con los materiales convencionales de mampostería usados en la industria de la construcción.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. Estructura tipo sándwich

Se entiende como estructura tipo sándwich en forma general, al compuesto conformado por dos caras y un núcleo que son unidos mediante un agente adhesivo como se ilustra en la **Figura 4**.

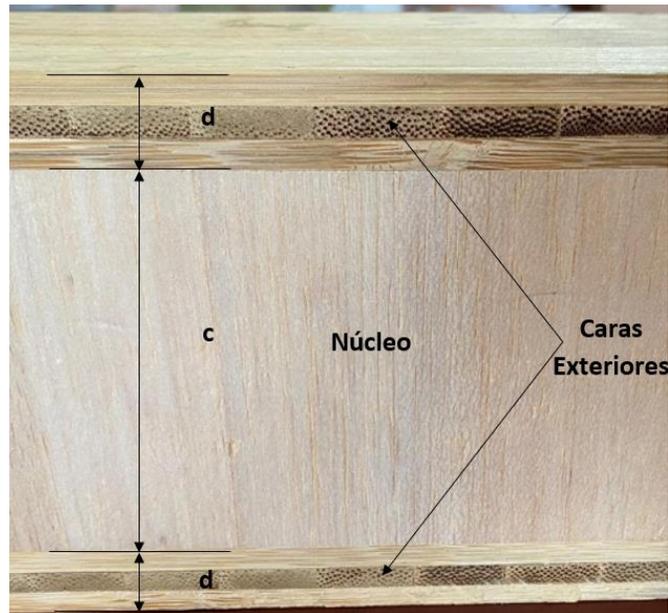


Figura 4. Estructura tipo sándwich

Este tipo de estructuras son principalmente simétricas, es decir, caras del mismo espesor y material, separadas por un núcleo homogéneo. En ciertas aplicaciones se puede tener estructuras asimétricas, por ejemplo, una estructura que en unas de sus caras va a soportar pocas cargas y bajas temperaturas mientras que su otra cara soporta altas temperaturas y está expuesto a los efectos del medioambiente requiriendo diferencias tanto de espesor como de material en las caras produciendo una estructura asimétrica (Vinson J. , 1999)

Entre las características primordiales de este tipo de estructura, se encuentra que las caras deben ser de un material con mayor resistencia y bajo espesor, al contrario del núcleo donde es prioritario su bajo peso y tiene mayor espesor, por último, el agente adhesivo debe ser capaz de transmitir los esfuerzos existentes entre las caras y el núcleo. La combinación de las características mencionadas anteriormente resulta en estructuras con mejores propiedades mecánicas comparadas con materiales tradicionales, razón por la cual su aplicación ha ido incrementando y diversificando a través del tiempo en varias industrias, llegando principalmente a: aeroespacial, naval, aeronáutica, automovilística y en los últimos años ganando terreno en la industria de la construcción.

2.1.1. Núcleo

La función principal del núcleo es resistir cargas cortantes transversales, además de proporcionar buenas características de aislamiento térmico y acústico. Dicho núcleo puede ser de varios tipos: núcleo sólido o espuma, núcleo panel de abeja, núcleo central y núcleo corrugado mostrados en la **Figura 5**. (Vinson J. , 1999)

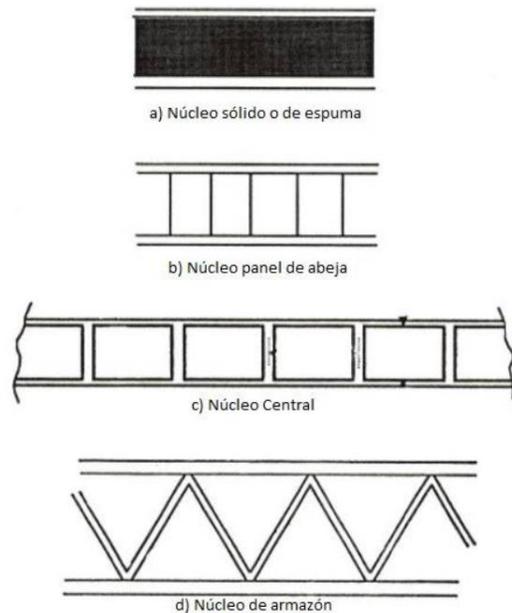


Figura 5. Tipos de núcleos
Fuente: (Vinson J. , 1999)

Sin embargo, en construcciones de núcleo central y núcleo corrugado, una parte de cargas de flexión son soportadas por los elementos de núcleo. (Vinson J. , 1999)

2.1.2. Caras

Se las define como los laminados de material que encierran al núcleo (Malavia, 2012).

Los materiales para las caras son diversos, y son los elementos que le proporcionarán al elemento sándwich su alta resistencia a la flexión. Propiamente dicho, las caras del material compuesto resisten casi todas las cargas en el plano y los momentos de flexión fuera del plano. Además, proporcionan casi toda la rigidez a flexión porque tienen un módulo de elasticidad más alto que el del núcleo, y están situadas a una mayor distancia del eje neutro de la estructura (Malavia, 2012).

Al existir una alta gama de materiales para usar como caras, se puede diseñar el tablero sándwich para que solvete variados requerimientos acorde a su aplicación, que van desde capacidad mecánica, acabado superficial, protección al fuego y agentes patógenos, etc.

Actualmente el material más común para las caras de un panel sándwich son las chapas de acero, y están destinados para uso industrial. La madera como un material para las caras de elementos sándwich ha ido ganando importancia en el área de la construcción, no solo como elementos de cerramiento, sino como un elemento estructural.

2.2. Bambú

El bambú ha sido parte de la historia del mundo, estando inextricablemente ligada a los medios de vida humana, satisfaciendo necesidades de vivienda, alimentos y papel, y más; la gama de usos que desarrolla, la vuelve incomparable en el reino vegetal, dándole el alias de “la planta de los mil usos” (Liese & Köhl, 2015). En el Ecuador su aporte material ha sido en las viviendas y como inmaterial en conocimientos patrimoniales de los pueblos, aportando una parte importante de

ingreso en las economías campestres. En la actualidad genera fuentes de trabajo en las diversas industrias que se dedican a su explotación.

Como se mencionó, el bambú es una planta multipropósitos capaz de sustituir a la madera tradicional en muchos aspectos, debido a sus tallos lignificados, su rápido crecimiento, su intrincado sistema de rizomas y añadiendo su sostenibilidad, ha convertido a este espécimen en una planta con valor de conservación, con la habilidad de mitigar los fenómenos causados por el calentamiento global (Liese & Köhl, 2015).

Cabe recalcar que las estructuras tipo sándwich han sido elaboradas con bambú de tipo *Dendrocalamus asper*, también conocido como bambú gigante del cual se deduce que, sus orígenes están en Asia y fue introducido en el Ecuador hace alrededor de 90 años por un conjunto de investigadores para la mejora agropecuaria y tiene como características:

- Altura promedio de 30 metros.
- Diámetro mayor a 20 centímetros.
- Su espesor puede estar comprendido entre 11 – 36 mm
- Buenas propiedades mecánicas

En Ecuador, se cuenta hace cuatro años con la Central del Bambú Andoas CENBA, la cual se encarga del procesamiento de bambú, dedicándose a la producción de tableros, tablones entre otros productos, conjuntamente brinda asesoría e investigación sobre el procesamiento. Esta central no posee la caracterización de su materia prima, es decir, no se tiene propiedades mecánicas por lo cual su uso es casi netamente para mueblería y pisos. Como se ha explicado anteriormente, en el trabajo de (Andino, 2019) se le ha dado un enfoque más avanzado utilizando los tableros como las

caras de una estructura compuesta tipo sándwich, planteada como mampostería alternativa. La investigación actual es la encargada de la caracterización dinámica de dichas estructuras.

2.3. Balsa

La balsa (*Ochroma pyramidale*), una madera tropical dura nativa de las Américas, es una de las especies de madera de más rápido crecimiento, que alcanza unos 20 m de altura y hasta 75 cm de diámetro en 5 – 8 años (Fletcher, 1951). La mayor parte de la madera de balsa que se utiliza comercialmente se extrae de plantaciones, especialmente del Ecuador. Debido a su rápido crecimiento, la densidad de la madera es muy baja, haciendo de la balsa la madera comercial más ligera disponible. Los valores de densidad para la balsa suelen oscilar entre 100 y 250 kg/m³, aunque pueden variar entre 60 y 380 kg/m³. La baja densidad es extremadamente valiosa en aplicaciones que requieren materiales ligeros con buenas prestaciones mecánicas.

La madera de balsa es uno de los materiales de núcleo preferidos en los tableros sándwich estructurales para palas de aerogeneradores, equipos deportivos, barcos y aviones. Las grandes variaciones de densidad en la balsa derivan predominantemente de las fibras y de las largas células prismáticas, que actúan como los principales elementos portadores de carga en la madera. (Borrega, Ahvenainen, Serimaa, & Gibson, 2015)

En consecuencia, las propiedades mecánicas de la balsa están relacionadas con su estructura celular y modeladas en base a mecanismos de deformación y falla. En la compresión axial, flexión y torsión, el módulo elástico y la resistencia aumentan linealmente con la densidad. En la compresión radial, el módulo y la resistencia aumentan de forma no lineal con la densidad, debido a la contribución combinada de fibras. (Borrega & Gibson, 2015)

La Empresa PLANTABAL S.A. siendo una industria precursora en la explotación de balsa y perteneciente al grupo 3A COMPOSITES, es la más importante empresa en la producción de madera

de balsa, quienes, a más de brindar productos de calidad, cuentan con sistemas de certificación como la ISO 9011:2015 y FSC (Forest Stewardship Council), avalando una gestión ambiental responsable. PLANTABAL S.A. fue la encargada de proporcionar el material para el núcleo de la estructura. Su producto BALTEK ® SB 100 fue seleccionado como la mejor alternativa para las estructuras en los trabajos de (Andino, 2019) y (García & Barrigas, 2019).

2.4. Fatiga

La fatiga de los materiales se refiere a los cambios en las propiedades que resultan de la aplicación de cargas cíclicas dando como resultado deformaciones y fracturas. Este comportamiento siempre ha sido causa de mucha preocupación en los diferentes enfoques de ingeniería, siendo el diseño el encargado de contrarrestar las grietas y posteriores fallas. Sin embargo, junto con el desarrollo de la “ciencia de los materiales” en las últimas décadas, la fatiga ha surgido como un problema de "mecánica de la fractura", un importante campo de investigación científica y aplicada que abarca disciplinas tan diversas como ciencia de los materiales (incluyendo la ciencia de los metales, cerámicas, polímeros, y composites), ingeniería mecánica, civil, aeroespacial, biomecánica, etc.

En la investigación desarrollada por (Monti, El Mahi, Jendill, & Guillaumat, 2018), donde se mantuvo un núcleo constante de balsa y dos tipos de caras las cuales, para el primer caso están conformadas de cinco capas unidireccionales de lino, y para el otro, estaban hechas de cuatro capas de lino se estudió los modos de fallo, así como la absorción de energía que tienen este tipo de estructuras. Además, la investigación realizada por (Bezazi, El Mahi, Berthelot, & Bezazi, 2009), dos tipos de estructuras sándwiches con diferentes tipos de núcleos fueron investigados en donde se determinó los mecanismos de falla, así como también las propagaciones de fractura al momento de realizar fatiga a diferentes cargas esta investigación al igual que el anterior fueron tomados como

referencia para el porcentaje de carga, frecuencia, análisis de energía realizados en este estudio, cabe aclarar que estos estudios han sido netamente experimentales sin una aplicación técnica destinada, como en el caso de la estructura sándwich propuesta la cual se lo utilizará como material de mampostería.

La vida a la fatiga del sándwich también está influenciada por varios factores como: la frecuencia de carga, factores ambientales como la temperatura y la humedad, y la naturaleza de la carga repetitiva. (Sharma, Gibson, & Ayorinde, 2006)

Los modos de fallo en la fatiga son a menudo similares a los observados en los modos estáticos, además para cargas cíclicas la falla es peculiarmente por cortante en el núcleo, como se observa en la **Figura 6**. Esto se debe al hecho de que la carga cíclica aparece para reducir la resistencia al cortante residual del núcleo. Este ha sido observado en varios estudios y Harte confirmó que la falla por fatiga de las vigas sándwich se produce en el núcleo. (Harte, Fleck, & Ashby, 2001)

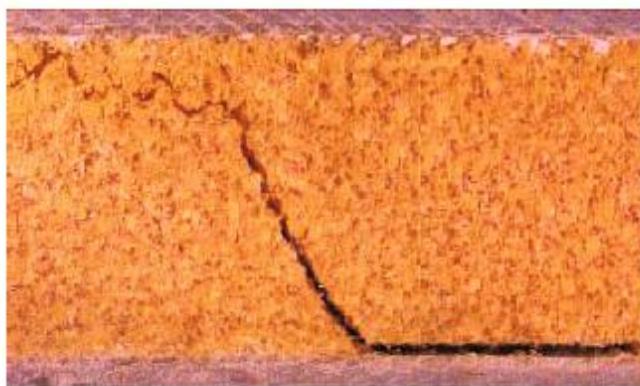


Figura 6. Fractura de un panel tipo sándwich sometido a fatiga al 90%

Fuente: (Bezazi, El Mahi, Berthelot, & Bezazi, 2009)

El ciclo de histéresis que proporciona un material idealmente elástico, teóricamente, sería una línea recta, pero ya en sólidos esto no sucede, el material sufre un desfase entre la tensión aplicada y la deformación producida, y lo que en realidad tiene lugar es un ciclo como el mostrado en la

Figura 7, su importancia radica en su aporte para el estudio de la energía. (Núñez, Roca, & Jorba, 2013)

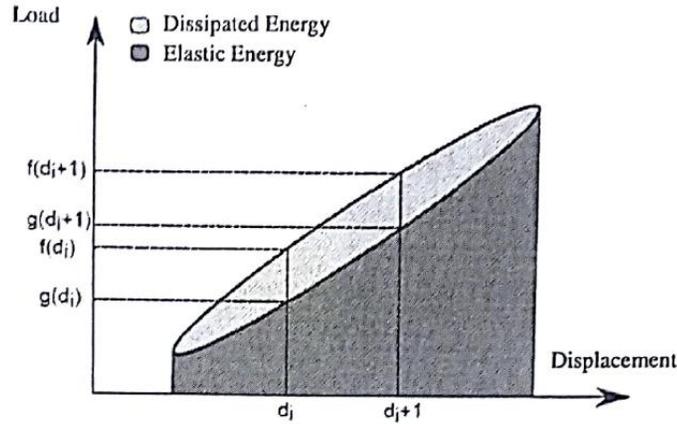


Figura 7. Ciclo de histéresis

Fuente: (Monti, El Mahi, Jendill, & Guillaumat, 2018)

Donde la máxima energía potencial E_p aplicada al sistema está dada como:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_{i+1} - d_i) (f(d_{i+1}) + f(d_i))$$

(Ec. 1) (Monti, El Mahi, Jendill, & Guillaumat, 2018)

Esto corresponde al área total bajo la curva fuerza-desplazamiento en la fase de carga del ciclo de histéresis, por otra parte, la energía elástica E_r viene dada por el área bajo la curva correspondiente a la fase de descarga y puede ser calculada como:

$$E_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_{i+1} - d_i) (g(d_{i+1}) + g(d_i))$$

(Ec. 2) (Monti, El Mahi, Jendill, & Guillaumat, 2018)

Por tanto, la energía disipada E_d viene dada por la diferencia de éstas o su similar el área dentro de la curva del ciclo de histéresis:

$$E_d = E_p - E_r \quad (\text{Ec. 3}) \quad (\text{Monti, El Mahi, Jendill, \& Guillaumat, 2018})$$

Esto también se ocupa para el cálculo del factor de pérdida que viene dado por:

$$\eta = \frac{E_d}{2\pi E_p} \quad (\text{Ec. 4}) \quad (\text{Monti, El Mahi, Jendill, \& Guillaumat, 2018})$$

2.4.1. ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure

Este “Método de prueba estándar para las propiedades de corte del núcleo de las construcciones de sándwich por viga a flexión” permite la obtención de propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, la resistencia al corte del núcleo y las resistencias a la compresión y a la tracción de los revestimientos. Este estándar es de gran utilidad ya que proporciona la configuración del ensayo dependiendo de la relación de espesor de las caras con el espesor del núcleo $d/c \leq 0.10$. Si no se cumple esta relación, la configuración del ensayo será no estándar o de 4 puntos mientras que, si la cumple será una configuración estándar o de 3 puntos, el esquema de dichas configuraciones se aprecia en la **Figura 8**.

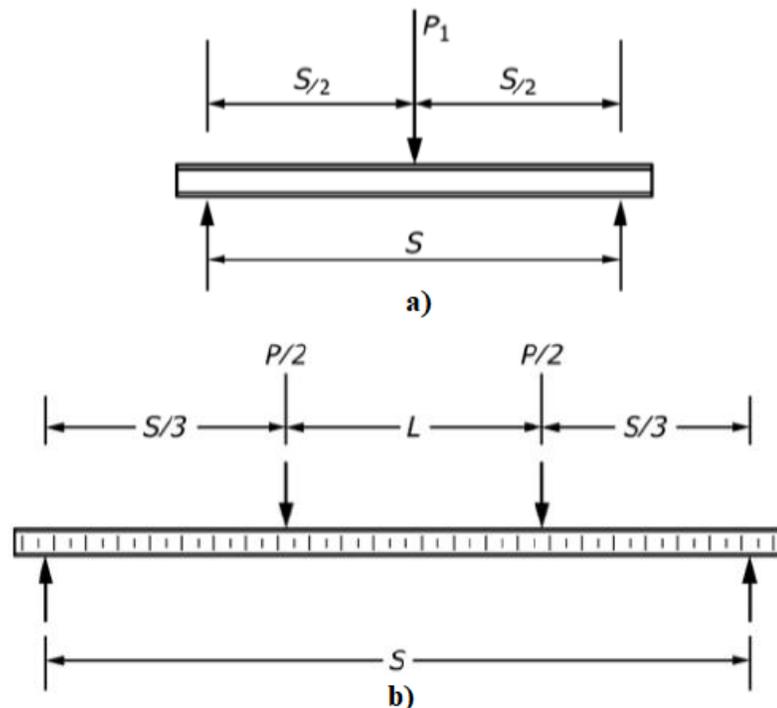


Figura 8. Configuración de ensayo a) Estándar o de 3 puntos y b) No estándar o de 4 puntos

Fuente: (ASTM C393 / C393M-16, 2016)

De la misma manera, el estándar proporciona las medidas de las muestras siguiendo ciertos lineamientos, los cuales dependen de la configuración:

- Configuración estándar o de 3 puntos: las medidas de las muestras son un ancho de 50 mm y un largo de 200 mm.
- Configuración no estándar o 4 puntos: para esta configuración, el ancho no debe ser menor a 2 veces el espesor ni mayor a 6 veces el mismo, tampoco debe sobrepasar la mitad de la longitud del tablero, la longitud de las muestras debe ser igual a la longitud entre apoyos más 50 mm o una mitad del espesor total, cualquiera de los dos que sea el mayor.

Además, establece una velocidad de desplazamiento del pistón para la elaboración del ensayo de 6 mm/min.

2.5. Vibración

Los compuestos estructurales tipo sándwich han ganado gran espacio en la industria de la construcción como material portante, por lo cual, la evaluación de sus propiedades a través de métodos de vibración se ha utilizado con éxito durante varias décadas, demostrando que las propiedades vibratorias no destructivas se correlacionan bien con los módulos de elasticidad, flexión o tracción y pueden utilizarse para obtener coeficientes de amortiguación y respuesta de fluencia. A medida que se desarrollan nuevos productos compuestos con crecientes demandas de rendimiento, se necesita contar con mejores herramientas de análisis para diferenciar los productos o para describir características de rendimiento mejoradas (Turk, Hunt, & Marr, 2008).

Para la determinación y evaluación del módulo de elasticidad, estado físico, propiedades elásticas y mecánicas en maderas existen varios métodos que puede ser utilizados los más comunes son métodos no destructivos los cuales se basan en el ultrasonido, estrés, vibración transversal y

más recientemente, la espectroscopia de infrarrojo cercano. (Leite, Gherardi, Souza, & Rabelo, 2012)

En el estudio realizado por (Leite, Gherardi, Souza, & Rabelo, 2012), se desarrolló un análisis de vibración transversal por ser un método simple rápido y eficiente para caracteriza las propiedades elásticas de diversos materiales, incluido la madera. Este estudio buscó las propiedades dinámicas de la madera Copaiba (*Copaifera langsdorffi*), donde las muestras se colocaron en soportes elásticos para generar vibraciones libres para generar la vibración se produce un ligero golpe con un martillo a una punta de madera en un extremo de la muestra. Las señales de entrada y salida se transmitieron utilizando un filtro de paso bajo y una tarjeta de adquisición de datos acoplada a una computadora y luego se registraron. Por la fácil y buena obtención de resultados este tipo de ensayos han sido altamente aplicados.

Para vibración transversal, la viga en cantiléver es uno de los métodos más empleados, su disposición se observa en la **Figura 9**.

El ensayo no destructivo de vibración transversal utiliza la relación entre el MOE y la frecuencia de oscilación de una viga. Esta relación es bien conocida y se puede obtener a través de un examen riguroso de la mecánica fundamental. (Ross, Geske, Larson, & Murphy, 1991)

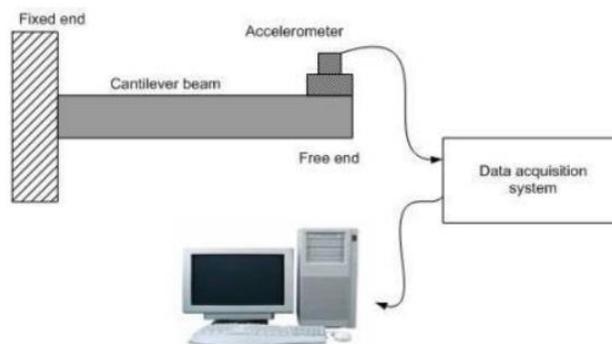


Figura 9. Esquema de ensayo de vibración
Fuente: (Ashish & Poonam, 2017)

La ecuación idealizada de vibración descuida los efectos de la fuerza de corte y el movimiento rotatorio en la muestra. Para determinar la magnitud relativa de los términos de la fuerza cortante a la solución idealizada, Timoshenko introdujo un factor de corrección, definido por el radio de giro dividido por la longitud libre (ecuación 5).

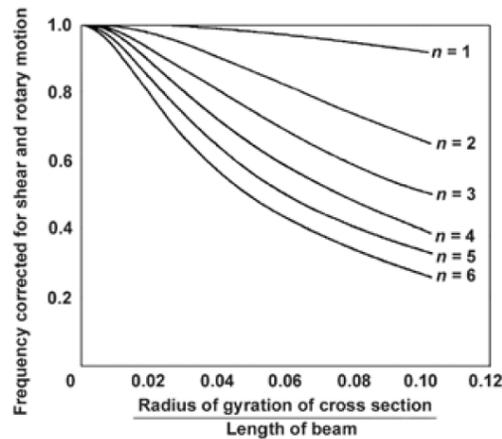


Figura 10. Curvas de corrección de frecuencia

Fuente: (Turk, Hunt, & Marr, 2008)

A partir de la ecuación (5), la corrección depende de la relación entre el espesor de la muestra y su longitud. Timoshenko presentó un conjunto de curvas mostradas en la **Figura 10**, para determinar el factor de corrección (donde n representa el modo de vibración). Por lo tanto, si se tiene cuidado de controlar la relación entre el espesor y la longitud de manera que el radio de giro dividido por la longitud libre (ecuación (5)) sea $<0,005$, el factor de corrección de frecuencia se aproxima a 1,0 de manera que los efectos de cortante y rotación sean insignificantes. Entonces para obtener efectos insignificantes, la relación l/t debe ser >58 . (Turk, Hunt, & Marr, 2008)

$$\frac{\text{Radio de giro}}{\text{Longitud libre}} = \frac{\sqrt{I}}{l_t} = \sqrt{\frac{t^2}{12l_t^2}} \quad (\text{Ecuación 5}) \quad (\text{Turk, Hunt, \& Marr, 2008})$$

Se sabe que un sistema puede vibrar con una amplitud apreciable para un cierto número de frecuencias, en general en una sola, por lo cual a cada frecuencia natural se coliga a una forma, a

la cual se llama modo normal o natural, que es asumida por el sistema durante la vibración libre en la frecuencia. Por ejemplo, cuando una viga uniforme con extremos simplemente apoyados o articulados vibra lateralmente en su frecuencia natural más baja o fundamental, asume la forma de una onda semisinusoidal, que es un modo normal de vibración. (Harris & Piersol, 2002)

Para el modo fundamental, que corresponde a la frecuencia natural más baja, los puntos soportados o fijos del sistema normalmente son los únicos puntos nodales; para otros modos, hay puntos nodales adicionales. En los modos de vibración correspondientes a las frecuencias naturales más altas de algunos sistemas, los nodos a menudo asumen patrones complicados. En ciertos problemas que involucran vibraciones forzadas, puede ser necesario saber cuáles son los patrones nodales (Harris & Piersol, 2002).

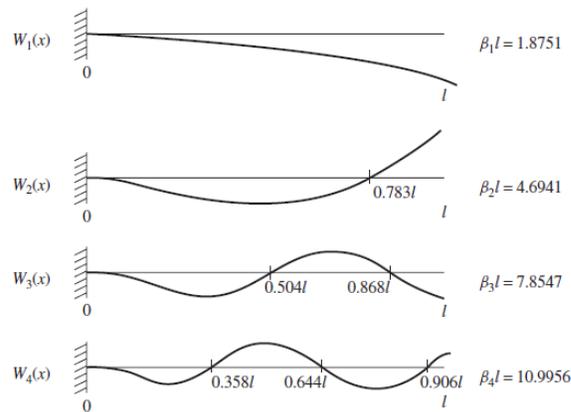


Figura 11. Modos de Vibración

Fuente: (Rao, 2007)

Por consiguiente, como se puede observar en la **Figura 11**, se presentan los modos de vibración de una viga cantiléver.

2.6. Transferencia de calor

El calor es una forma de energía que se transfiere de una parte caliente a una parte fría de un cuerpo o sustancia, es decir, de alta temperatura a otra de baja temperatura, para lo cual no es

necesario que los cuerpos estén en contacto, pero siempre debe existir una diferencia de temperaturas para que exista el fenómeno.

Además, los materiales de baja conductividad térmica son deseables en muchas aplicaciones en las que es necesario ahorrar energía y lograr el confort térmico. En respuesta a estos requisitos, la investigación desarrollada por (Vitale, Francucci, & Stocchi, 2016), donde se fabricaron estructuras sándwich utilizando caras compuestas de fibra de vidrio y yute unidas a diferentes núcleos: madera de balsa, Divinycell y panales. En este trabajo se midieron las propiedades térmicas y la densidad de los paneles sándwich obteniendo los mejores resultados con la madera de balsa y el Divinycell $\lambda=0.061$ y $\lambda=0.053$ respectivamente. Es por esto la importancia de tener una estructura tipo sándwich que presente valores de baja conductividad térmica.

La cantidad de calor puede ser determinada en algunos casos por leyes fundamentales de la termodinámica y mecánica de fluidos, mientras que en otros es necesario el desarrollo de experimentos para su determinación mediante métodos empíricos. La transferencia de calor se da por tres medios los cuales son conducción, convección y radiación como se ilustra en la **Figura 12** (Sundén & Fu, 2017).

Para el presente proyecto se trató únicamente el modo de transferencia por conducción, por lo cual, se tratará solo lo concerniente al tema.

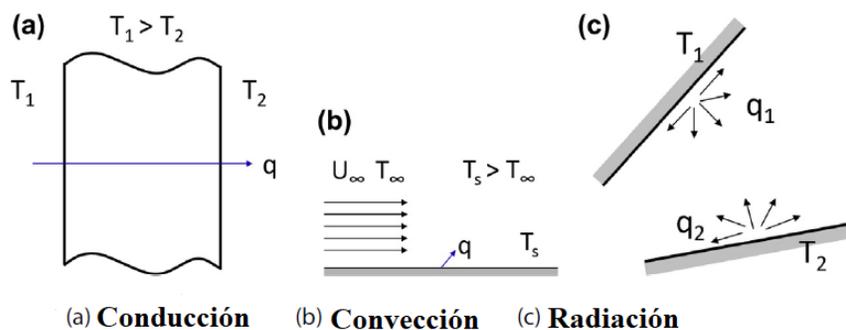


Figura 12. Tipos de transferencia de Calor

Fuente: (Sundén & Fu, 2017)

2.6.1. Conductividad térmica

Es una propiedad térmica de los materiales que cuantifica la capacidad de transferencia de calor por conducción mediante un proceso de difusión, en el que la energía térmica se transfiere de un extremo caliente de un medio sólido a su extremo frío a través de un intercambio de energía intermolecular (Kreith, Raj, & Mark, 2011).

De donde se determina la conductividad térmica mediante la ley de Fourier:

$$Q = A K \left(- \frac{dT}{dx} \right)$$

(Ec. 6) (Velasco Roldán, Goyos Pérez, Delgado García, & Freire Amores, 2016)

2.6.2. Conducción unidimensional

Esto se refiere a que se necesita una coordenada para la variación, en este sistema existen gradientes de temperatura a lo largo de un solo eje y la transferencia ocurre exclusivamente en dicha dirección, además se caracteriza por condiciones de estado estable, pese a su simplicidad inherente este modelo se utiliza para representar de forma precisa numerosos sistemas de ingeniería (Incropera & De Witt, 1999).

2.6.3. Coeficiente de Conductividad térmica de un material

El coeficiente de conductividad corresponde a la capacidad de un material para transmitir una cantidad de calor a través de dos superficies en una unidad de tiempo determinada (ScienceDirect®, 2019).

2.6.4. ASTM C177-13 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate

Apparatus

Este “Método de prueba estándar para las mediciones de flujo de calor en estado estable y las propiedades de transmisión térmica por medio del aparato de placa caliente protegida” establece los criterios para las mediciones de laboratorio de flujo de calor en estado estable, cuando sus superficies están en contacto con sólidos, además, permite un amplio rango de diseños de aparatos y precisiones, los cuales se ajustan para satisfacer los requisitos de problemas específicos.

El dispositivo normalizado para la determinación de la conductividad térmica de las muestras se describe en la norma y debe contar de una placa caliente, la cual está encargada de proporcionar el flujo de calor hacia las muestras, y una placa fría que permitirá generar la diferencia de temperaturas entre las dos superficies para que ocurra la conducción. Debe existir un mecanismo de ajuste para asegurar el contacto de las muestras con la placa caliente y placa fría. Es necesario contar con una cámara de vacío para producir ausencia total de transferencia por convección. El dispositivo se rige por principios de flujo unidireccional y estacionario a través de una o dos muestras planas.

La decisión de muestreo, selección, montaje y posicionamiento de muestras, preconditionamiento, selección de condiciones de prueba y evaluación de datos no están especificados en el estándar, pero se recomienda el uso de guías, estándares, prácticas o regulaciones para su desarrollo, si éstas no son aplicables se acepta los criterios de ingeniería aceptados por principios de transferencia de calor.

En la **Figura 13** se muestra un esquema idealizado de los flujos de calor presentes en la ejecución del ensayo.

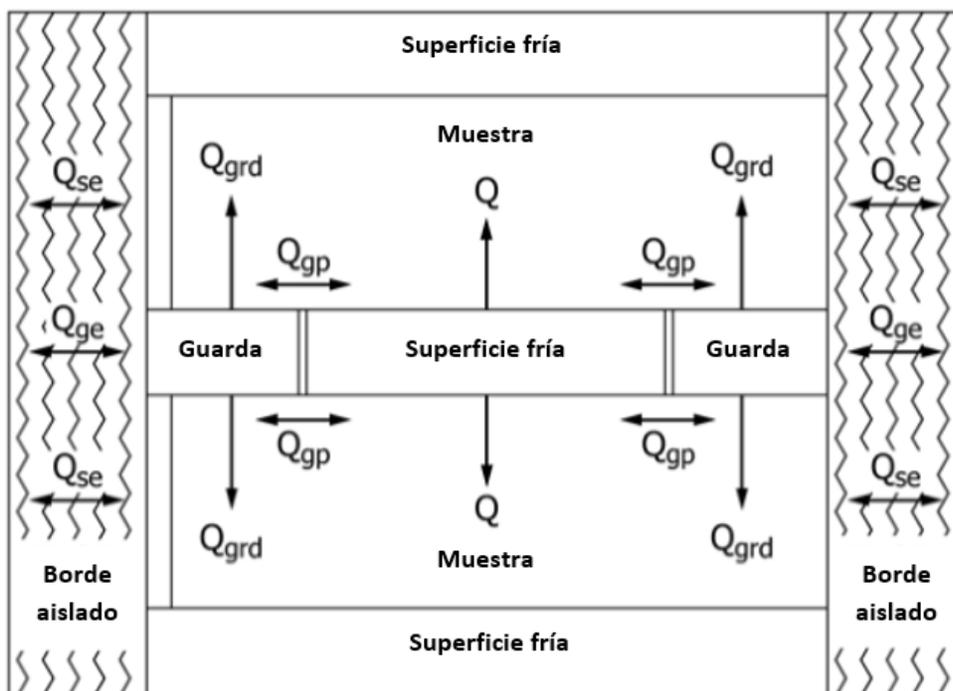


Figura 13. Esquema idealizado de flujos de calor
Fuente: (ASTM C177-19, 2019)

Al ser amplio los criterios de diseño del dispositivo, la norma permite dos configuraciones de ensayo, las cuales son de lado simple y de lado doble, diferenciados entre sí por el número de muestras evaluadas por ensayo y que el flujo de calor generado por la placa caliente en el caso de la configuración de lado doble se distribuye de manera equitativa por cada muestra, lo cual no sucede en la configuración de lado simple en donde la muestra se ve afectada por la totalidad del flujo de calor generado por la placa caliente.

Se debe precautelar que las muestras cubran en su totalidad el área de la placa caliente y la guarda. Si se tiene muestras de tamaño limitado es deseable que la misma cubra el espacio existente entre la placa caliente y su guarda.

Para que el registro de datos a través de este método sea válido, se debe alcanzar estado estable, es decir, que no exista cambios en sus propiedades a lo largo del tiempo.

2.7. Coeficiente de Absorción de Energía Acústica

2.7.1. SAC

Sound absorption Coefficient, por sus siglas en inglés es también conocido como el coeficiente de absorción de sonido, es un número entre cero y uno utilizado para describir la calidad de absorción sonora de una superficie y cuantificar la proporción de energía sonora incidente que no regresa a la habitación en forma de reflexión. Mientras más alto es el valor del SAC más sonido se absorbe y se transforma en calor dentro del material o se transmite, es decir, pasa a través del material. De forma recíproca, mientras el valor del SAC es más bajo, más sonido se refleja y menos sonido se absorbe o se transmite, por ejemplo, una ventana abierta tiene un valor de 1 ya que nada de sonido es reflejado a una habitación. De esta manera podemos concluir que el valor de coeficiente de absorción teórico para un reflector perfecto (teórico) es de 0, en la **Figura 14** muestra los tipos de energía presentes en este fenómeno (Ermann, 2015).

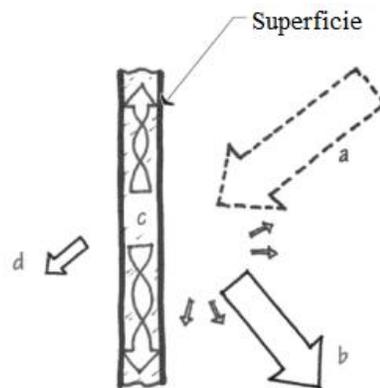


Figura 14. Tipos de Energía sonora
Fuente: (Ermann, 2015)

Donde:

a: Energía sonora total incidente

b: Energía sonora reflejada

c: Energía sonora absorbida

d: Energía sonora transmitida

Para su mayor comprensión trataremos un ejemplo, una hoja de techo colgado donde su coeficiente es de 0.80, es decir el 20% de energía sonora se refleja y el 80% se absorbe o se transmite. Tomando en cuenta el ejemplo, afirmar que el 80% de sonido es eliminado por la bandeja es una farsa, ya que en realidad todos los materiales tienen coeficientes de absorción variables los cuales dependen de las frecuencias incidentes y son agrupadas y descritas con valores de banda de octava. De esta manera, una hoja de techo puede tener un coeficiente de absorción de 0.80 a 1000 Hz, y un coeficiente de absorción de 0.32 a 125 Hz. (Ermann, 2015)

Como consideración general los materiales porosos, de menor peso tendrán mayor coeficiente de absorción a comparación de materiales que no cumplan con estas características, existen valores referenciales para predecir si un material es fonoabsorbente con coeficiente mayor a 0.50 o reflejante con valores de coeficiente menores a 0.2, en donde no se percibe un cambio de coeficiente de absorción de menos de 0.10, y se juzga que un cambio de más de 0.40 es considerable. (Ermann, 2015)

2.7.2. Bandas de octava

El oído humano tiene un rango muy amplio de audición que va desde los 16 Hz hasta los 16 KHz, pero medir el nivel de sonido en las 15984 frecuencias existentes en este rango no es viable, sabiendo que el oído humano responde mejor a relaciones de frecuencias. El intervalo de frecuencias en el que se realizan las mediciones se denominan un ancho de banda en cual puede describir a f_1 como la frecuencia inferior y f_2 como la frecuencia superior. En acústica, los anchos de banda se especifican a menudo en términos de octavas, donde una octava es un intervalo de frecuencia tal que la frecuencia superior sea el doble de la frecuencia inferior. En algunos casos se

utilizan divisiones más refinadas como en el caso de 1/3 de octava en donde $f2/f1 = 2^{1/3} = 1.260$ (Barron, 2003).

2.7.3. Tubo de Kundt

El tubo de medición acústica, también conocido como tubo de Kundt o tubo de impedancia se utiliza para medir impedancias de campo y reflectancias en el plano terminal de un tubo, el cual, puede ser excitado por una fuente de sonido en un extremo mientras que en el extremo opuesto se encuentra la muestra a ser ensayada, para evitar la reflexión el micrófono ubicado en la parte superior del tubo se mueve a lo largo del mismo y está encargado de medir la presión de sonido en función de su posición como se puede apreciar en la **Figura 15**. (Blauert & Xiang, 2009)

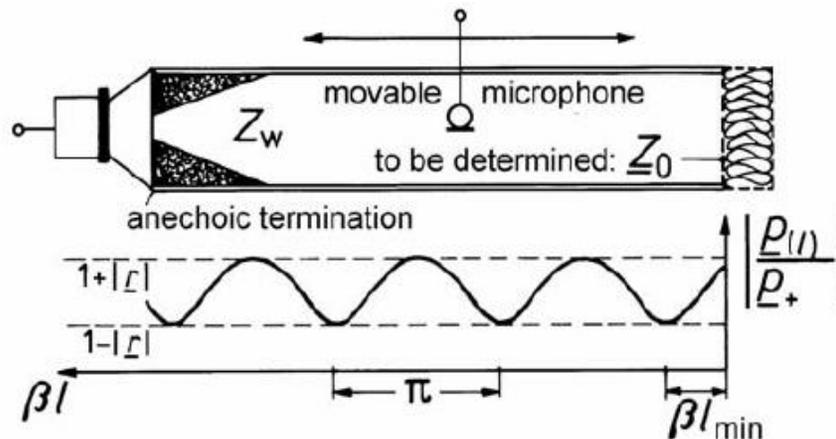


Figura 15. Disposición de tubo de Kundt para medir la impedancia
Fuente: (Blauert & Xiang, 2009)

2.7.4. Método de función de transferencia

Es un enfoque alternativo, el llamado método de función de transferencia, la reflectancia compleja es igual a cero y, en consecuencia, la impedancia de terminación puede medirse sin necesidad de desplazar mecánicamente los micrófonos. En su lugar, se emplean dos micrófonos a una distancia mutua de l_{Δ} representada en la **Figura 16** (Blauert & Xiang, 2009).

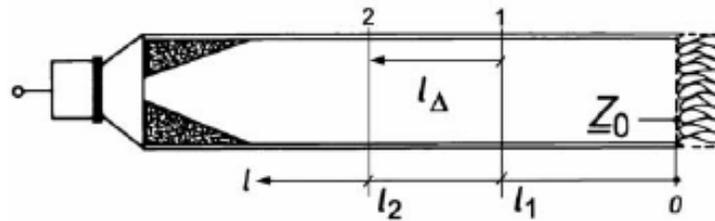


Figura 16. Disposición de tubo de Kundt para medir la impedancia con función de transferencia

Fuente: (Blauert & Xiang, 2009)

2.7.5. ASTM 1050 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.

El “Método de prueba estándar para la impedancia y la absorción de materiales acústicos utilizando un tubo, dos micrófonos y un sistema digital de análisis de frecuencia” se usa para la determinación de los coeficientes de absorción de sonido de incidencia normal y las relaciones de coeficiente de absorción de energía acústica específica normal de los materiales. Este método es aplicable para productos de madera, fibra de vidrio y también para productos de espuma, materiales de revestimiento, telas, papeles y pantallas. El equipo utilizado dependerá del uso práctico y debido a esto, los diámetros de los tubos poseen diferentes valores.

Las medidas de las muestras dependerán del diámetro del tubo de impedancia, pero para su montaje se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tener la misma forma y área de la sección transversal del portamuestras
- Evitar un excesivo apriete entre muestra y portamuestras, a fin de evitar posibles deformaciones en la muestra.
- Limitar la holgura entre los bordes de la muestra y el portamuestras.
- Se deberá sellar cualquier holgura o hueco periférico con arcilla para moldear.

Se establece un mínimo de dos muestras para ser ensayadas manteniendo las mismas condiciones de montaje, si alguna muestra presenta una superficie no uniforme, deberá ser reemplazada. Los valores obtenidos deberán ser promediados.

2.8. Comportamiento al fuego

2.8.1. Incendio

Puede definirse como la propagación no controlada de una reacción química hacia elementos no destinados a quemarse a través de una llama. Para que suceda dicha reacción y se mantenga es imprescindible que interactúen parámetros básicos que constituyen el llamado tetraedro del fuego: calor o energía de activación, combustible, comburente y reacción en cadena.

Los incendios son clasificados como estructurales, vehiculares o forestales (Muñoz, 2016).

Un incendio puede tener escenarios distintos en los cuales se pueda propagar, ya sea en lugares cerrados o abiertos, cada uno de ellos posee una evolución específica de acuerdo con los parámetros en los que se encuentra. (Ureña & Alvarado, 2016)

Existen una tipificación normalizada para el fuego descrita en la norma UNE-EN 2-1994/A1 de 2005, un resumen se presenta en la **Figura 17**.

2.8.2. Comportamiento al fuego de estructuras y sus materiales

La exposición de una estructura a las elevadas temperaturas que se desarrollan en un incendio afecta la durabilidad y las prestaciones mecánicas de sus materiales. El daño producido puede ser variable en función de los materiales almacenados en la estructura, ya que su naturaleza define su combustibilidad y su tendencia a extender el fuego (Señas, Maiza, Priano, Marfil, & Valea, 2010).

Clase	Concepto
Clase A: SÓLIDOS	Incendios que implican sólidos inflamables que dejan brasas, generalmente de naturaleza orgánica como la madera, tejidos, goma, papel y algunos tipos de plástico.
Clase B: LÍQUIDOS.	Incendios que implican líquidos inflamables o sólidos licuables como el petróleo, la gasolina, aceites, pintura, algunas ceras y plásticos.
Clase C: GASES	Incendios que implican gases inflamables, como el gas natural, el hidrógeno, el propano o el butano.
Clase D: METALES.	Incendios que implican metales combustibles como el sodio, el magnesio, el potasio o muchos otros cuando estén reducidos a virutas muy finas (como el aluminio).
Clase F: ACEITES Y GRASAS DE COCINA.	Incendios derivados de la utilización de estas materias en aparatos de cocina.

Figura 17. Clasificación del fuego

Fuente: (Núñez & Manobanda, 2017)

Los materiales constructivos tienen 2 comportamientos frente al fuego: reacción y resistencia.

La reacción al fuego se define como el nivel de contribución al desarrollo de este a través de su propia combustión. De acuerdo con la norma UNE 23.727-80, se clasifican los materiales empleados en la construcción de edificios, a efectos de su reacción al fuego, en las siguientes clases: No combustible, No inflamable, Difícilmente inflamable, Medianamente inflamable, Fácilmente inflamable. (Urbán, 2013)

La resistencia al fuego está definida en el Documento Básico SI: Seguridad Caso de Incendio como la capacidad de un elemento de construcción para mantener durante un período de tiempo determinado la función portante que le sea exigible, así como la integridad y/o el aislamiento térmico en los términos especificados en el ensayo normalizado correspondiente (Código Técnico de la Edificación, 2006).

Existen materiales con una reacción al fuego muy buena, pero las construcciones con estos materiales tienen mala resistencia al fuego, tales como el acero o el hormigón armado. (Urbán, 2013)

2.8.3. Comportamiento al fuego de la madera

Las múltiples propiedades que presenta la madera, apoyadas por rigurosos ensayos, la han colocado como una fuerte opción para material constructivo estructural, y no solo por su valor estético, sino también por ser un material seguro en casos de incendio.

La madera está clasificada como medianamente inflamable pudiendo llegar a difícilmente inflamable, dependiendo del tipo de madera y de productos ignífugos aplicados (Urbán, 2013).

La estabilidad al fuego de la madera es mejor que otros materiales como se muestra en la **Figura 18**.

Entonces podemos concluir que la madera tiene una mala reacción al fuego, pero también es cierto que tiene muy buena resistencia al mismo, siendo esta característica fundamental en dar un tiempo de huida para la evacuación de vidas humanas y bienes (Urbán, 2013).

2.8.4. Protección de la madera frente al fuego

Si la madera no logra cumplir los requisitos exigidos para resistencia al fuego o reacción al fuego existen mecanismos que favorecen dichas características.

Entre dichos mecanismos figuran la formación de una película de baja conductividad térmica o formación de gases incombustibles ante una elevación de temperatura.

Así es como la aplicación de productos ignífugos o intumescentes, los cuales, modifican el comportamiento al fuego de la madera impidiendo la combustión sostenida, aumentando la temperatura para la ignición o disminuyendo la velocidad de propagación de las llamas.

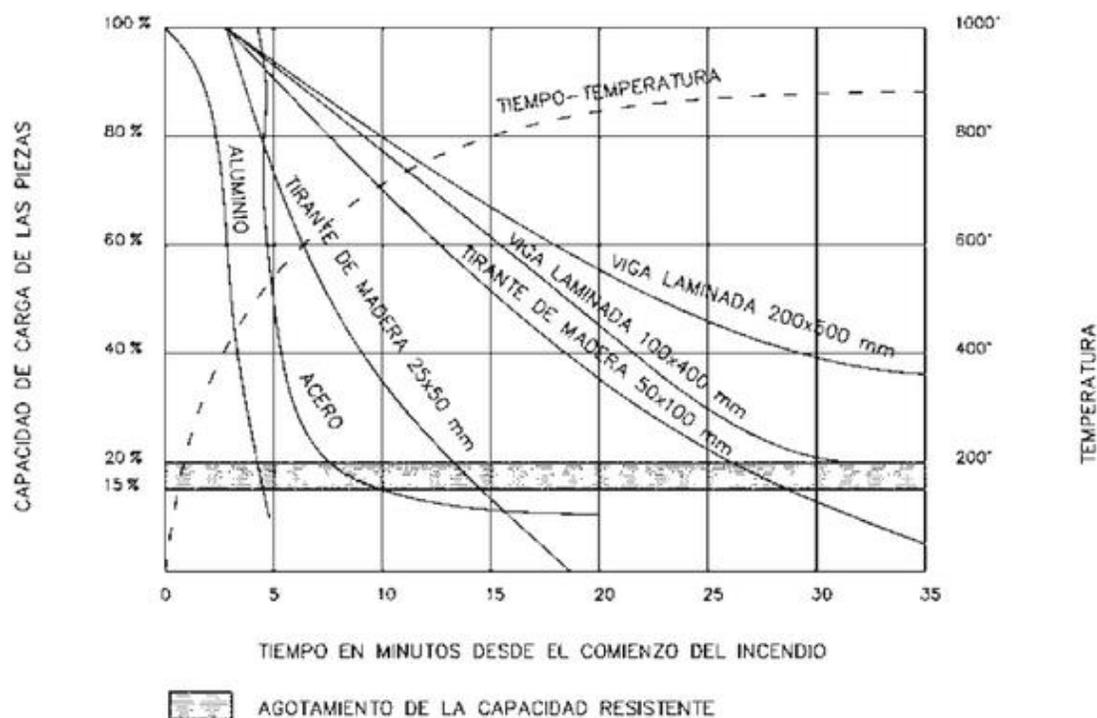


Figura 18. Estabilidad al fuego de varios materiales.
Fuente: (Urbán, 2013)

2.8.5. ASTM E2707- 15 Standard Test Method for Determining Fire Penetration of Exterior Wall Assemblies Using a Direct Flame Impingement Exposure

El “Método de prueba estándar para determinar la penetración del fuego en los ensamblajes de paredes exteriores utilizando una exposición directa al impacto de la llama” establece los parámetros para evaluar el comportamiento frente al fuego de una muestra colocada en disposición longitudinal y expuesta directamente a la llama.

Cuando se realice el ensayo se establece una documentación visual a color y de ser posible grabar el procedimiento del ensayo en su totalidad. Se presenta la opción de utilizar cámaras infrarrojas en la cara no expuesta para documentar la evolución del incremento de temperaturas. Las muestras deberán cumplir con las medidas de 1200 mm x 2400 mm y establece una duración de una hora para la culminación del ensayo.

Por estar presentes altas temperatura y procesos de combustión se recomienda tener las debidas precauciones y el uso de equipos de seguridad personal por el riesgo de ignición de materiales ajenos al ensayo y el riesgo de inhalación de humos producto de la combustión.

CAPITULO III

ENSAYOS

Como punto de partida del proyecto se realizó la elaboración de dos prototipos de tableros estructurales, para lo cual en primera instancia se retiró los paneles de bambú (caras) en la Central de Bambú Andoas (CENBA) ubicada en Pedro Vicente Maldonado, como se puede ver en la **Figura 19**. Las dimensiones nominales de las caras de bambú son 2400 x 600 x 15 mm, y fueron cortadas a las medidas nominales de los tableros estructurales resultando la dimensión final en 1200 x 600 x 15 mm.



Figura 19. Embarque de las caras de bambú

Una vez que se retiró los paneles de bambú (caras), se procedió al traslado hacia la empresa PLANTABAL S.A. ubicada en Quevedo, donde se encontraban los paneles de balsa (núcleo) y el equipo necesario para la elaboración de los tableros estructurales. En las instalaciones se nos guio

al área de prensado, en donde se procedió a la fabricación de los tableros estructurales sándwich, misma que se la realizó lo más semejante al proceso descrito por (Andino, 2019).

Dicho proceso fue llevado de la siguiente manera:

- Se dispuso las caras en forma horizontal para poder dispersar el poliuretano líquido sobre las mismas, este procedimiento se hizo a mano como se muestra en la **Figura 20**, debido a que el aspersor eléctrico no se encontraba disponible y se lo realizó una cara a la vez.



Figura 20. Distribución del poliuretano líquido en la cara superior de bambú

- Se tomó la cara superior ya con el poliuretano líquido y se la colocó en el núcleo de balsa tomando como referencia una esquina ya que el núcleo poseía mayores dimensiones. Esta referencia ayudó a un correcto posicionamiento entre la cara y núcleo, de igual forma se procedió con la cara inferior. Culminado este procedimiento se llevó el tablero y se lo colocó para su prensado por 30 minutos a una presión de 120 psi, que fue la presión entregada por el equipo, este proceso se lo realizó para cada tablero estructural. La prensa utilizada para el proceso descrito fue

adaptada para las condiciones de fabricación de los tableros, en donde se introdujo un tope para producir el prensado debido a que el recorrido de la prensa no permitía alcanzar dimensiones tan bajas como el espesor de los tableros descritos, como se puede apreciar de mejor manera en la **Figura 21**. Tuvo que realizarse esta adaptación debido a que la prensa utilizada en las anteriores investigaciones se encontraba en mantenimiento.



Figura 21. Prensado de Tableros

- Una vez concluido el proceso se obtuvo 5 tableros estructurales con espesor promedio de 124 mm (prototipo 2) y 2 tableros estructurales con espesor promedio de 75 mm (prototipo 1), como lo muestra la **Figura 22**, los cuales fueron embarcados y posterior traslado a las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE para la elaboración de los ensayos.



Figura 22. Embarque de los tableros para su posterior traslado

3.1. Ensayo a Flexión

3.1.1. Ensayo a Flexión Estático

El ensayo a flexión toma de la norma ASTM C 393 como referencia, iniciando por encontrar la relación $d/c \leq 0.10$ obteniendo los siguientes valores:

Tabla 1

Valores de la relación d/c

	d [mm]	c [mm]	d/c
Prototipo 1	17	44	0.386
Prototipo 2	17	89	0.191

Como se puede observar en la **Tabla 1** los espesores de los elementos del tablero no cumplen con la relación, por lo cual se dispone una configuración no estándar o de 4 puntos.

Además, al no contar con el equipo idóneo para la fabricación de tableros estructurales usados en investigaciones previas nos vimos en la necesidad de hallar propiedades estáticas acorde a los tableros que fueron fabricados, motivo por el cual se procedió a realizar 2 ensayos estáticos tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2.

Previo a la elaboración de los ensayos estáticos, se elaboró los accesorios adecuados, ya que el equipo no contaba con los mismos, para lo cual se realizó una simulación en SAP 2000 de un perfil IPE 180 en donde se verificó que su deflexión máxima fue 0.2254 mm sometida a la capacidad de fuerza máxima del equipo (100 KN). Considerando que los ensayos llegarían a cargas menores se tomó que la deflexión del accesorio no alterará los resultados de la prueba. Se realizó este análisis al accesorio de soporte ya que tiene mayor riesgo de pandeo al poseer elevados momentos de flexión, en la **Figura 23** se muestra los resultados de dicha simulación.



Figura 23. Simulación elaborada para el accesorio de soporte

Con los accesorios listos, se realizaron las pruebas pertinentes para verificar su buen funcionamiento. Para la puesta en marcha del equipo marca Instron 8801 se contó con la capacitación del Ing. Francisco Navas y el Ing. Lenin Abatta, quienes son los encargados. La capacitación consistió en el correcto uso del software del equipo Instron 8801 lo cual permitió adecuar el método para los ensayos estáticos, así también, se ajustó ciertos parámetros en el equipo como el cerrar las mordazas de sujeción antes de ponerlo en marcha para que no exista errores de mediciones.

Los parámetros que se tomaron para la ejecución del ensayo fueron los siguientes:

- Una velocidad de movimiento del pistón de 6 mm/min tomada de ASTM C393.
- Las medidas tomadas de ASTM C393 para configuración no estándar o 4 puntos para las muestras se detallan en la **Figura 24**.

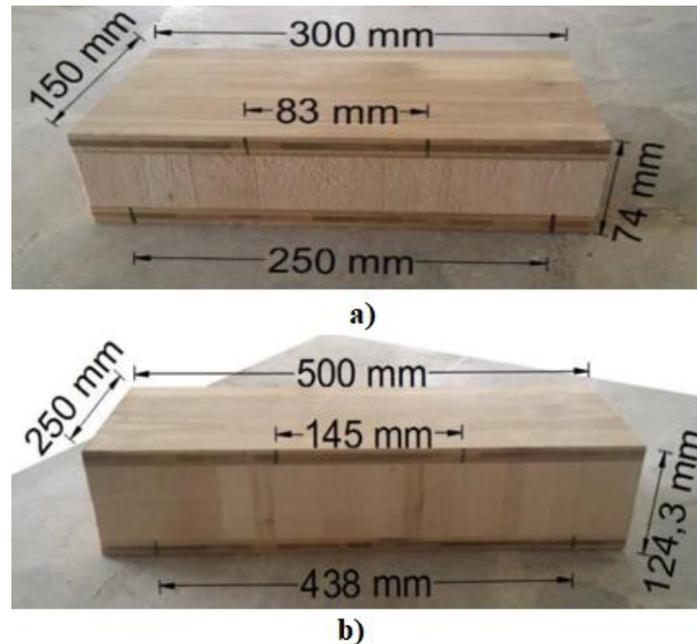
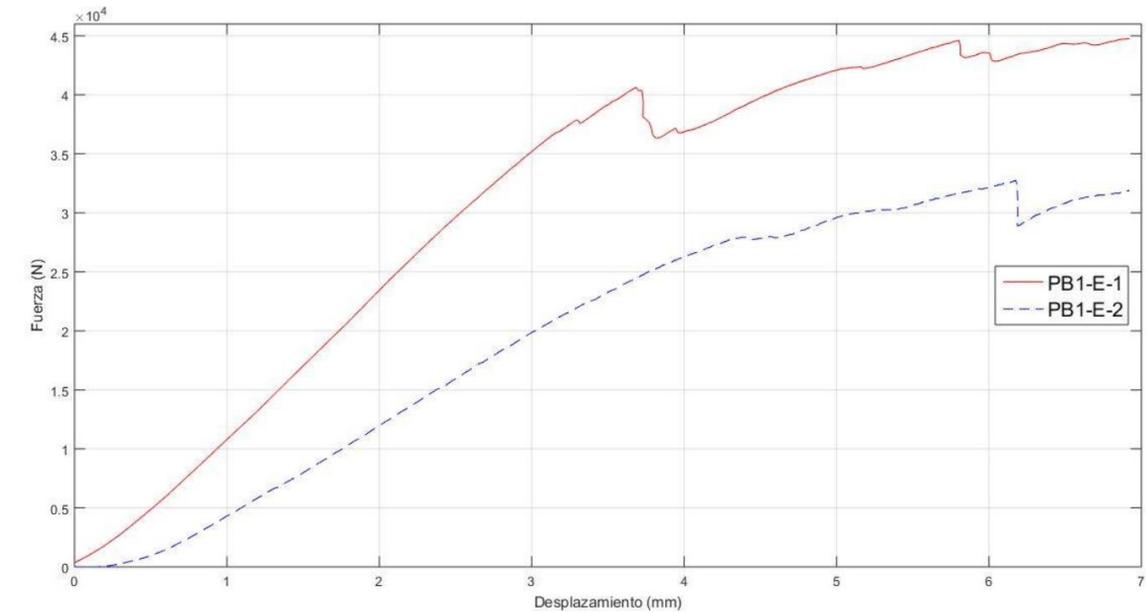


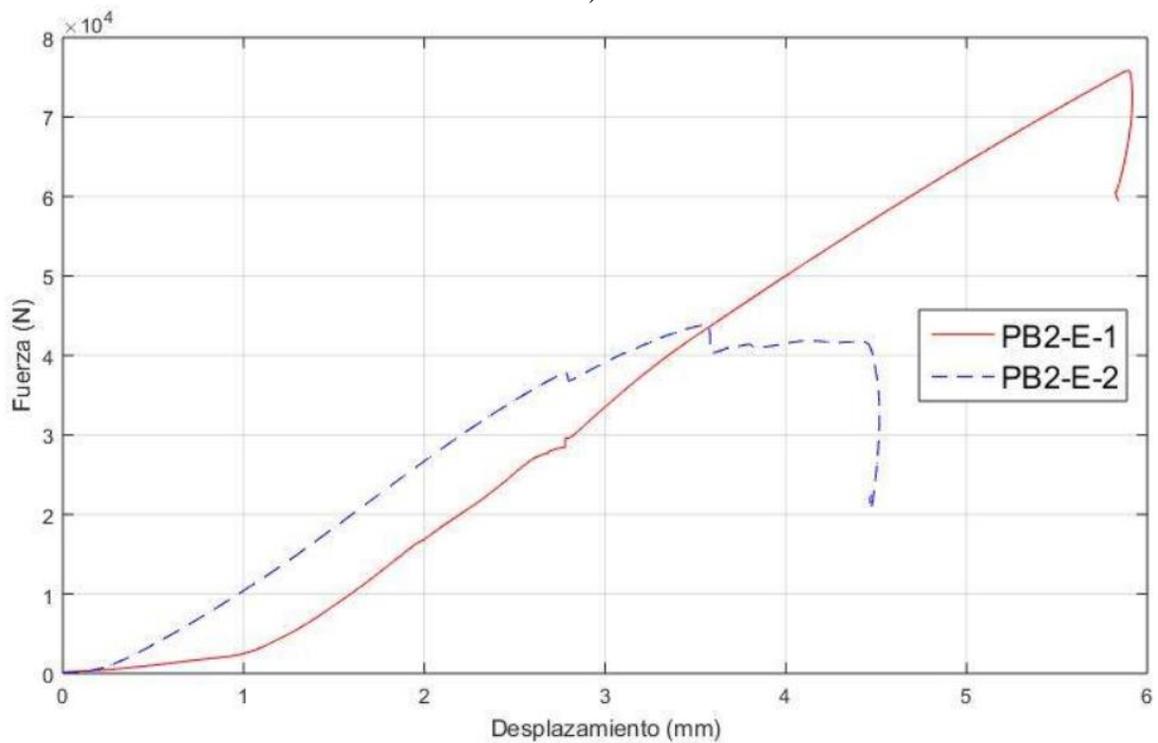
Figura 24. Medidas de las muestras para ensayo estático
a) prototipo 1 y b) prototipo 2
Fuente: (Andino, 2019)

Para garantizar un correcto posicionamiento de las muestras respecto a los ejes de carga y de apoyo, es decir estén centradas, se realizaron marcas en la muestra en los lugares donde se asentaron los puntos de apoyo como se puede observar en la **Figura 26**. Verificada la posición de la muestra se procedió a la realización del ensayo, obteniendo las curvas de fuerza-desplazamiento como la mostrada en la **Figura 25**, donde la parte a) presenta los valores obtenidos por las dos muestras del prototipo 1, existiendo una variación de aproximadamente 8000 [N], mientras que b), presenta los valores obtenidos de las dos muestras del prototipo 2 en donde existe una variación

aproximada de 32000 [N], además, la **Tabla 2** presenta las fuerza y desplazamientos máximos mostrados en la **Figura 25**.



a)



b)

Figura 25. Graficas Fuerza-Desplazamiento a) Prototipo 1 y b) Prototipo 2



Figura 26. Marcas de puntos de carga y apoyo

Tabla 2

Fuerzas y desplazamientos máximos en ensayo estático prototipo 1 y 2.

Prototipo 1			Prototipo 2		
Muestra	Fuerza Máxima [N]	Desplazamiento Máximo [mm]	Muestra	Fuerza Máxima [N]	Desplazamiento Máximo [mm]
PB1-E-1	40417.2	3.6478	PB2-E-1	75537	5.8567
PB1-E-2	32755.59	6.177	PB2-E-2	43752.6	3.5243

3.1.2. Cálculo del Módulo de Elasticidad Equivalente

El módulo de elasticidad a flexión de tablero estructural fue calculado mediante el uso de viga compuesta, para lo cual se calculó los módulos de elasticidad del bambú y de la balsa, en donde la pendiente del gráfico esfuerzo-deformación está representada por la relación F/δ y fue obtenidas en la máquina de ensayos universales, en flexión a tres puntos.

3.1.2.1. Moduló de elasticidad de las caras de bambú:

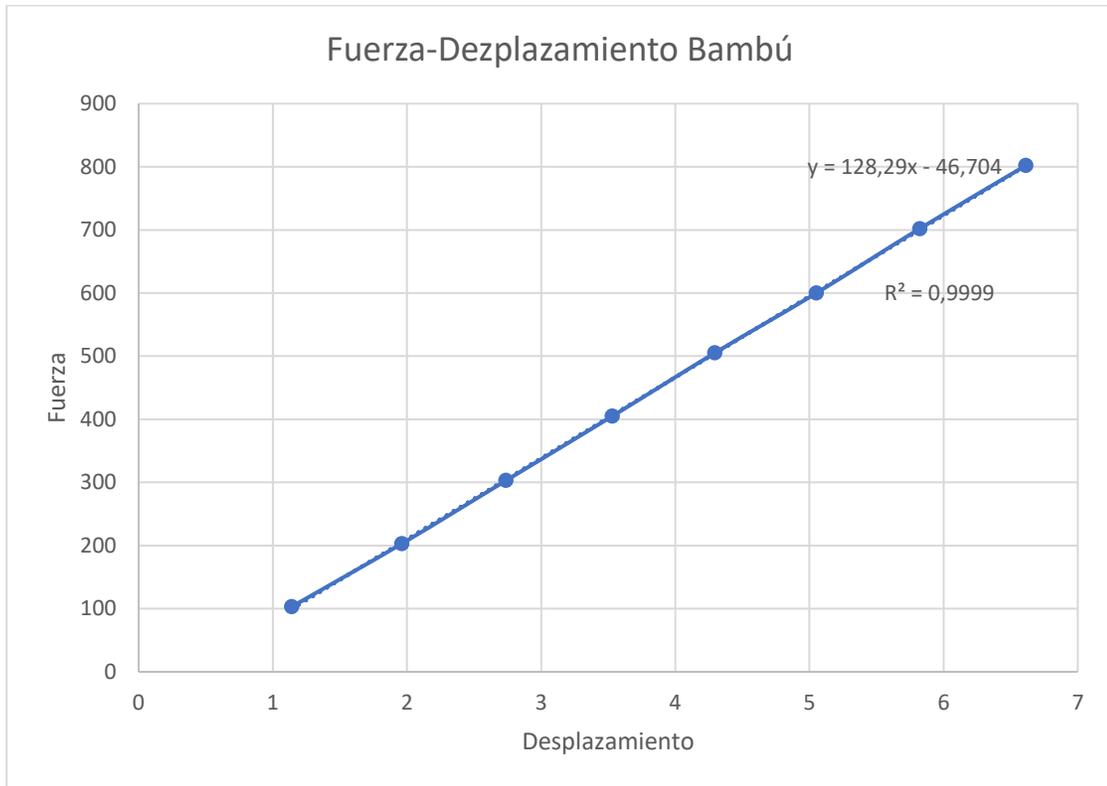


Figura 27 Diagrama Fuerza-Desplazamiento para el Bambú

La **Figura 27** muestra el valor de la pendiente obtenida para el bambú, representada como F/δ , se presenta una recta ya que el ensayo no fue realizado hasta la falla del material, además, R^2 muestra una perfecta correlación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido.

$$\frac{F}{\delta} = 128.29 \frac{N}{mm}$$

$$E_B = \frac{F * l^3}{48\delta I}$$

$$E_B = 12.67 \text{ GPa}$$

3.1.2.2. Módulo de elasticidad del núcleo de balsa:

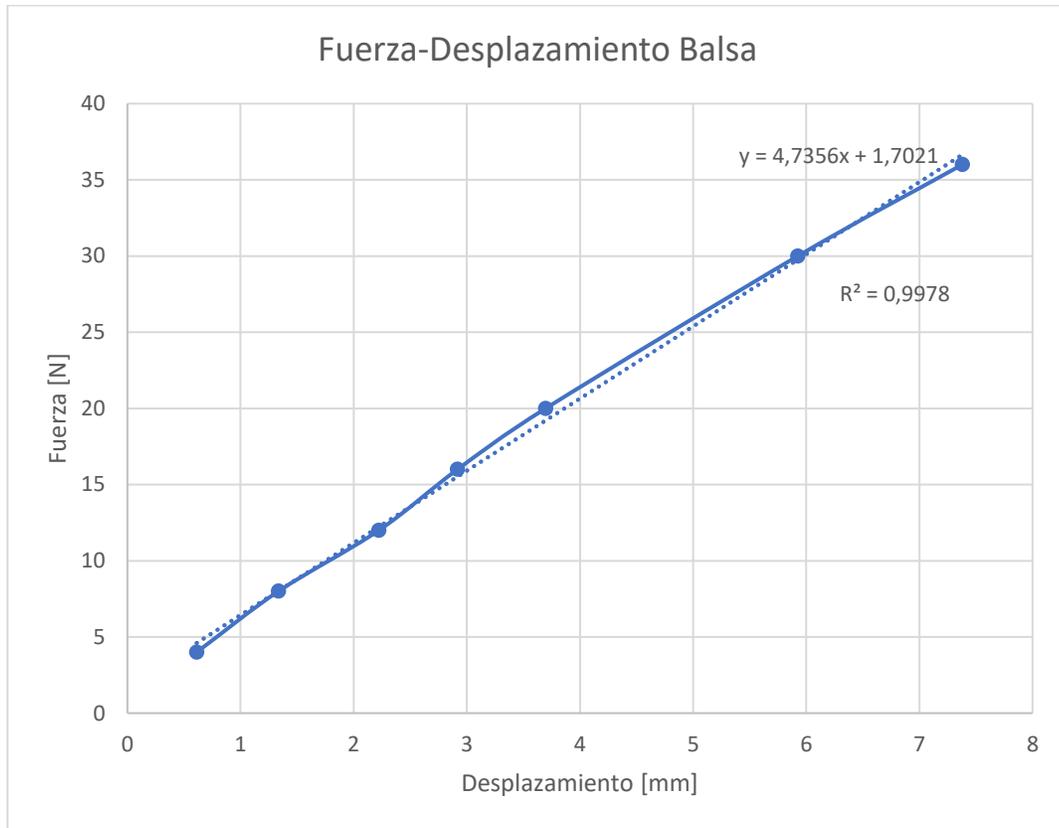


Figura 28 Diagrama-Desplazamiento para la Balsa

La **Figura 28** muestra el valor de la pendiente obtenida para la balsa, representada como F/δ , al igual que el caso anterior solo se presenta una recta ya que la muestra no fue cargada hasta llegar a la falla, además, R^2 muestra una perfecta correlación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido.

$$\frac{F}{\delta} = 4.7356 \frac{N}{mm}$$

$$E = \frac{F * l^3}{48\delta I}$$

$$E_{Ba} = 93.54 MPa$$

Se encuentra el valor z existente entre estos dos materiales:

$$z = \frac{E_B}{E_{Ba}}$$

$$z = 135.45$$

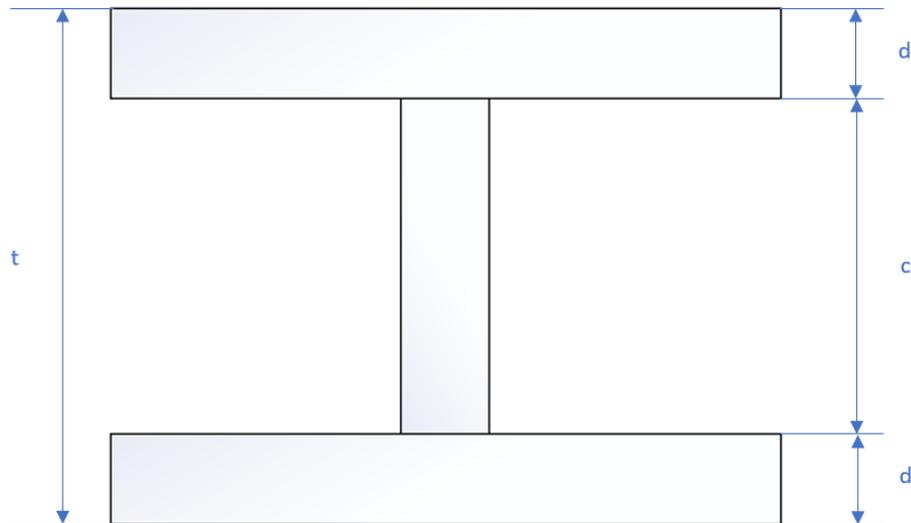


Figura 29. Idealización de viga compuesta de un material sándwich

3.1.2.3. Cálculo de Módulo de Elasticidad Prototipo 1

Para encontrar la inercia equivalente utilizada en el cálculo del módulo de elasticidad, se dividió el ancho del núcleo de balsa para el factor de equivalencia (z), de esta manera encontramos una inercia correspondiente a analizar una viga compuesta solo de bambú y que toma la forma de una viga tipo I como se muestra en la **Figura 29**.

$$I_{EB} = \left[\frac{1}{12} * w * d^3 + w * d * \left(\frac{c}{2} + \frac{d}{2} \right)^2 \right] * 2 + \frac{1}{12} * \frac{w}{z} * c^3$$

$$I_{EB} = 4142183.53 \text{ mm}^4$$

Ensayo de Flexión a cuatro puntos del prototipo 1:

La **Figura 30**, muestra el ensayo a flexión estático para el prototipo 1 con mayor capacidad de carga, del cual se obtuvo la pendiente, representada como F/δ , la pendiente utilizada se toma de la

recta que va desde el punto 0, hasta el punto de fluencia, debido a que se presenta los valores obtenidos hasta la rotura de la muestra.

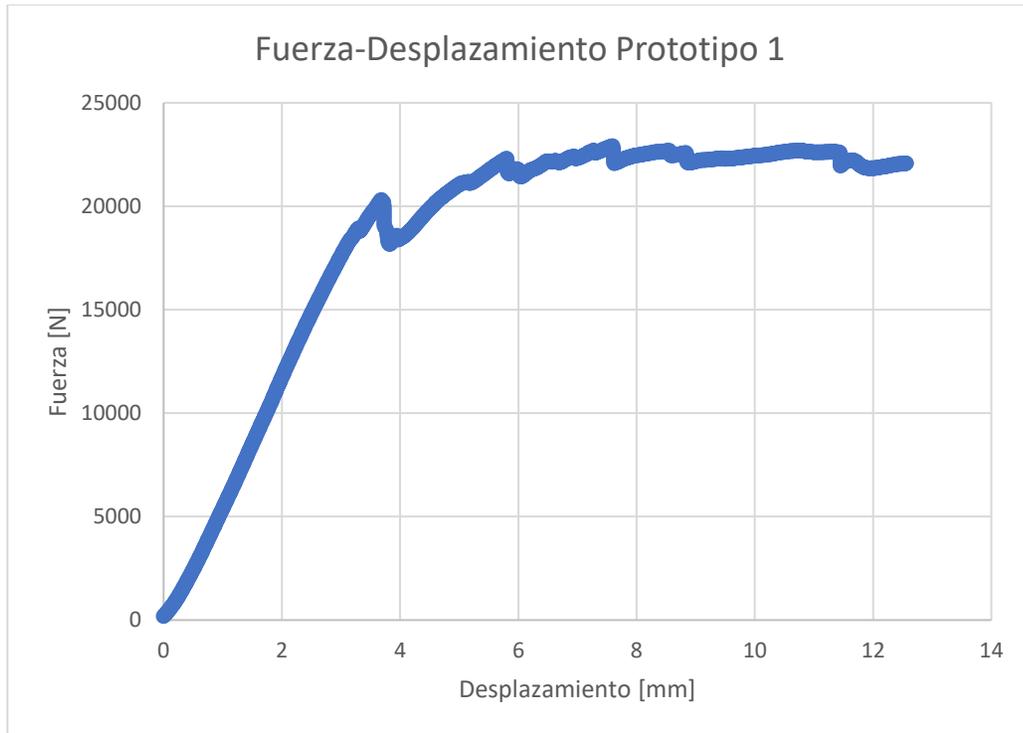


Figura 30 Gráfico Fuerza-Desplazamiento Prototipo 1

$$\frac{F}{\delta} = 6287 \frac{N}{mm}$$

$$E = \frac{F * a}{24\delta I_{EB}} * (3l^2 - 4a^2)$$

$$E = 841.53 MPa$$

3.1.2.4. Cálculo del Módulo de Elasticidad Prototipo 2

Al igual que en anterior caso se divide el ancho del núcleo de balsa para el factor de equivalencia (z), de esta manera encontramos una inercia equivalente correspondiente a analizar una viga compuesta solo de bambú y que toma la forma de una viga tipo I como se muestra en la **Figura 29**.

$$I_{EB} = \left[\frac{1}{12} * w * d^3 + w * d * \left(\frac{c}{2} + \frac{d}{2} \right)^2 \right] * 2 + \frac{1}{12} * \frac{w}{z} * c^3$$

$$I_{EB} = 20397822.73 \text{ mm}^4$$

Ensayo de Flexión a cuatro puntos:

La **Figura 31**, muestra el ensayo a flexión estático para el prototipo 2 con mayor capacidad de carga, del cual se obtuvo la pendiente, representada como F/δ , la pendiente utilizada se toma de la recta que va desde el punto (1, 1445), hasta el punto hasta el punto de fluencia, esto debido a que los valores de 0 a (1, 1445) no son de relevancia para el estudio y modificarían el valor real de la pendiente.



Figura 31 Gráfico Fuerza-Desplazamiento Prototipo 2

$$\frac{F}{\delta} = 7883.6 \frac{N}{mm}$$

$$E = \frac{F * a}{24\delta I_{EB}} * (3l^2 - 4a^2)$$

$$E = 1.15 \text{ GPa}$$

3.1.3. Ensayo de flexión a fatiga

El ensayo de flexión a fatiga al igual que el estático toma la norma ASTM C393 como referencia para su disposición, como ya se calculó la relación d/c y mantenido constantes tanto el espesor de

las caras y del núcleo que son las variables que intervienen en su cálculo sabemos que la disposición será no estándar o de 4 puntos como se muestra en la **Figura 32**.

El ensayo de fatiga se lo realiza para determinar la capacidad de disipación de energía de los tableros estructurales tipo sándwich y el factor de pérdida.



Figura 32. Ensayo de Fatiga en 4 puntos

3.1.3.1. Preparación de muestras

Para determinar la capacidad de disipación de energía se elaboró un plan de ensayos donde su única variante fue el porcentaje de carga máxima usado como límite para el ensayo de flexión a fatiga. Se estableció 3 estados de carga para aplicar el ensayo de flexión a fatiga a los 2 prototipos los cuales son a 55%, 70% y 90% de la carga máxima, determinada por ensayos estáticos a flexión mostrados en la **Tabla 2**, como lo realizó (Bezazi, El Mahi, Berthelot, & Bezazi, 2009) en su estudio. Las cargas máximas de los ensayos estáticos a flexión presentan variación como lo muestran la **Tabla 2** para los prototipos 1 y 2. La variación presentada se debe a la no

homogeneidad de los tableros debido al método constructivo, y se adoptó como carga máxima a flexión estática los valores más altos para cada prototipo, mismos que fueron establecidas en 40376 N y 75460 N para el prototipo 1 y prototipo 2 respectivamente. Las dimensiones de muestras y dimensiones entre apoyos y puntos de carga se especifican en la **Figura 24**.

Para una correcta identificación de las muestras se les asignó un código compuesto por 5 dígitos: los 2 primeros son PB refiriéndose a “prototipo bambú”, el tercer dígito corresponde al tipo de prototipo pudiendo ser 1 o 2, el cuarto dígito corresponde al tipo de ensayo que sería F en alusión a “fatiga”, el quinto dígito correspondiente al número de muestra. La identificación se completa señalando el porcentaje de carga utilizada para cada muestra, un ejemplo de identificación se muestra en la **Figura 33**. Las dimensiones de las muestras para el prototipo 1 y 2 se las presenta en la **Tabla 3**.



Figura 33. Identificación de muestras a fatiga

La totalidad de las muestras para el ensayo a flexión fueron cortadas de tableros estructurales enteros cuyas dimensiones nominales son: 1200mm x 600mm x el espesor del respectivo prototipo, evidenciando que el tablero no presente falta de unión entre núcleo y pieles.

3.1.3.2. Desarrollo del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de Mecánica de Materiales, en el equipo de ensayo de fatiga Instron 8801 que posee una capacidad de 10 toneladas.

Los accesorios usados para el ensayo estático a flexión siguen siendo válidos para los ensayos de flexión a fatiga.

Acorde a los lineamientos de la norma ASTM C393, las barras de carga y apoyo permiten la rotación libre respecto de las muestras.

Tabla 3
Medidas de las muestras para el ensayo de Fatiga

PROTOTIPO 2					PROTOTIPO 1				
Muestra	Espesor mm	Largo mm	Ancho mm	Masa kg	Muestra	Espesor mm	Largo mm	Ancho mm	Masa kg
PB2-F-1 90%	123.70	501.0	250.0	5.46	PB1-F-1 90%	76.56	300.0	150.0	1.471
PB2-F-2 90%	124.04	501.0	249.0	5.398	PB1-F-2 90%	78.40	298.0	150.0	1.564
PB2-F-1 70%	124.60	499.0	249.0	5.235	PB1-F-1 70%	77.48	299.0	151.0	1.529
PB2-F-2 70%	124.10	501.0	249.0	5.375					
PB2-F-1 55%	123.84	502.0	248.0	5.311	PB1-F-1 55%	78.00	299.0	150.0	1.509
PB2-F-2 55%	124.74	499.0	249.0	5.175	PB1-F-2 55%	77.68	300.0	150.0	1.562

Como se puede observar en la **Tabla 3**, el prototipo 1 se ensayó una sola muestra al 70% de la carga máxima, debido a que los tableros estructurales del prototipo 1 eran limitados.

El procedimiento del ensayo de flexión a fatiga se realizó acorde a los pasos a continuación:

- Disposición adecuada de barras de carga y de apoyo en los accesorios según el prototipo a ensayar.
- Centrado de los accesorios en el equipo y correcta ubicación de las muestras en los puntos de contacto de los accesorios es igual que en el ensayo estático mostrado en la **Figura 26**.
- Es necesario el análisis de la fuerza del pistón F_p , que produce un efecto inercial debido a la masa m del accesorio de puntos de soporte y al ser el ensayo de carácter dinámico, se origina

una fuerza $m\ddot{x}$ presente en cada ensayo de fatiga, que altera la fuerza captada por la celda de carga F . El esquema de este análisis se lo muestra en la **Figura 34**. Este efecto fue descartado ya que se lo tomó como un efecto propio de la máquina mismo que siempre estará presente.

- Diseño del método que efectúa el equipo en la ejecución del ensayo, estableciendo la precarga, entendida como la carga media entre los puntos máximos y mínimos, y la amplitud de carga para cada muestra, y manteniendo constante la frecuencia en 5 Hz. La carga mínima para todos los ensayos fue fijada 1000 [N] por motivo de seguridad para evitar la pérdida de contacto entre la mordaza y los accesorios ni se produzca un efecto de impacto entre los mismos.
- Ejecución continua del ensayo e inspección de la muestra, mientras no se presenten alguna de las siguientes condiciones: falla de la muestra o el número de ciclos alcanza un valor de 10^5 .
- Los datos obtenidos fueron desplazamiento del punto central de la muestra, y la fuerza requerida para alcanzar dicho estado.

3.1.3.3. Resultados

En la **Figura 35** se muestran los lazos de histéresis producidos mediante el ensayo de flexión a fatiga del prototipo 1.

En la **Figura 36** se muestra los lazos de histéresis generados mediante el ensayo de flexión a fatiga del prototipo 2.

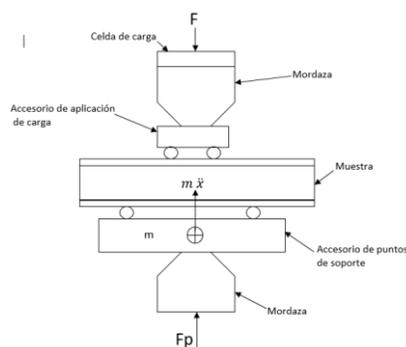
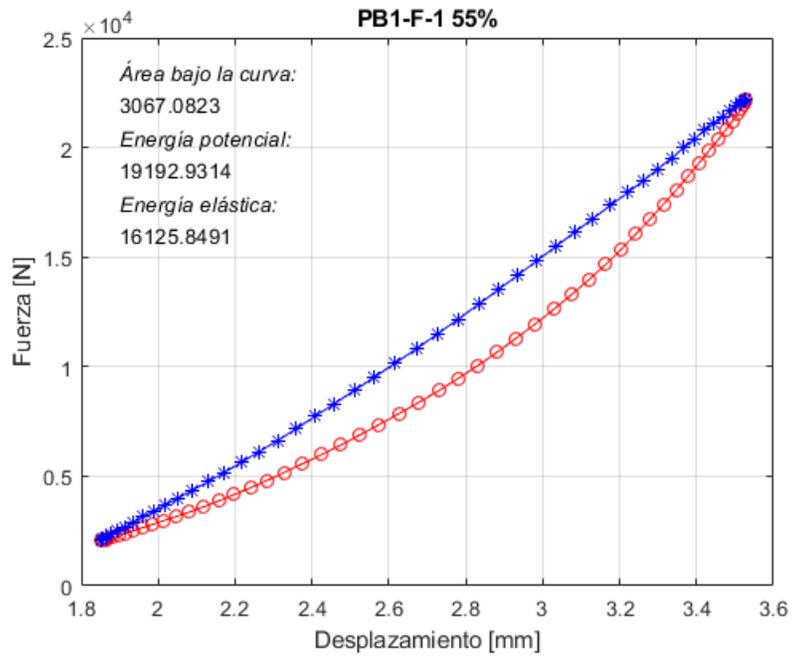
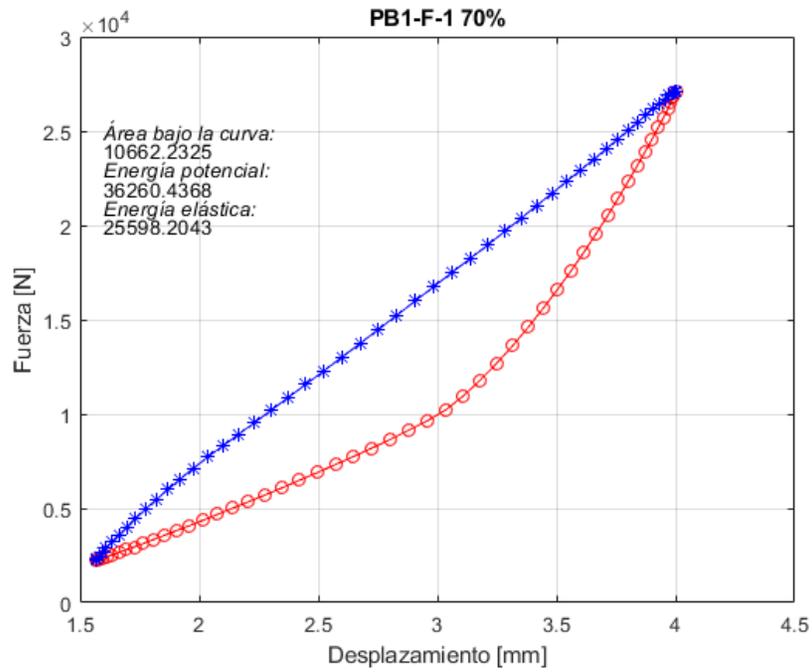


Figura 34. Esquema del efecto de la masa de accesorio

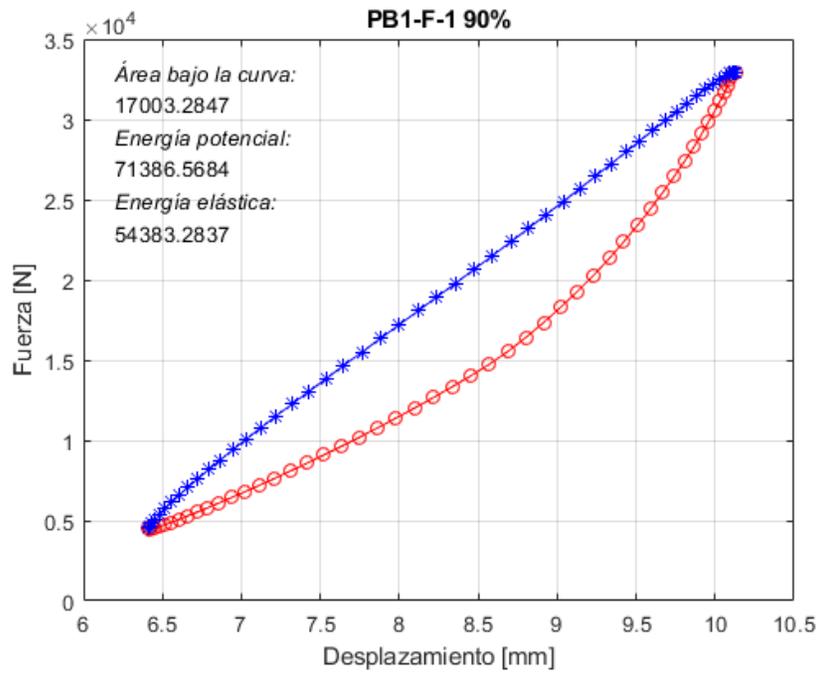


a)



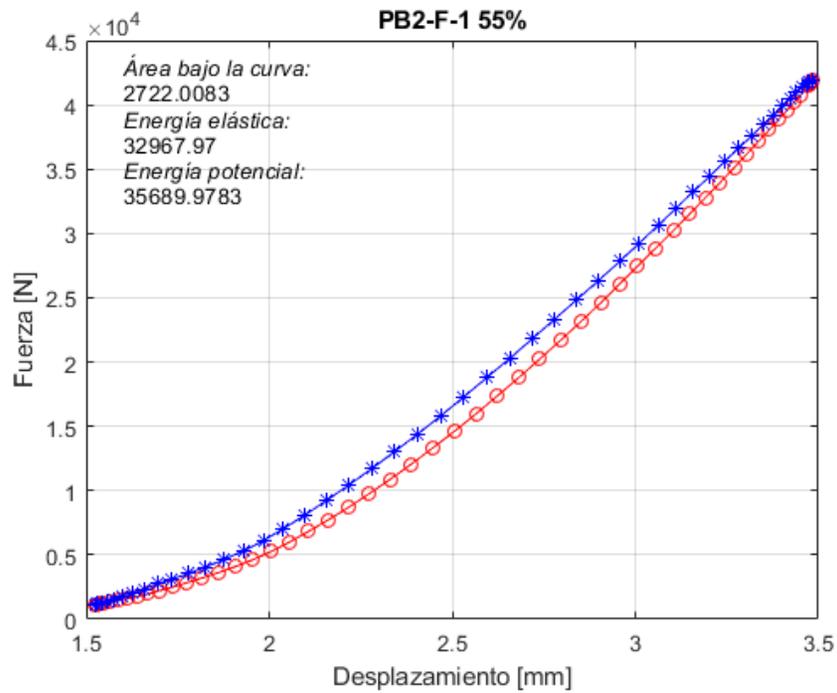
b)

CONTINÚA



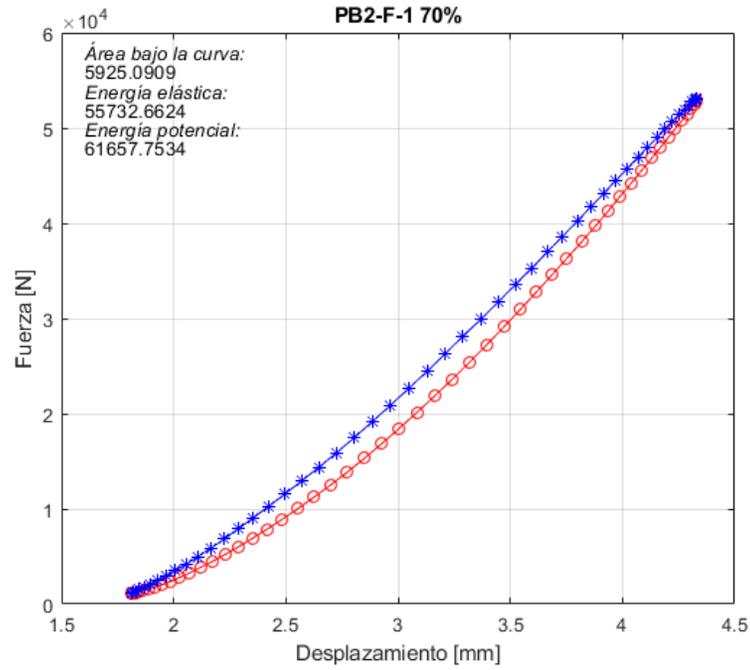
c)

Figura 35. Lazo de histéresis prototipo 1 a)55%
b) 70% y c) 90%

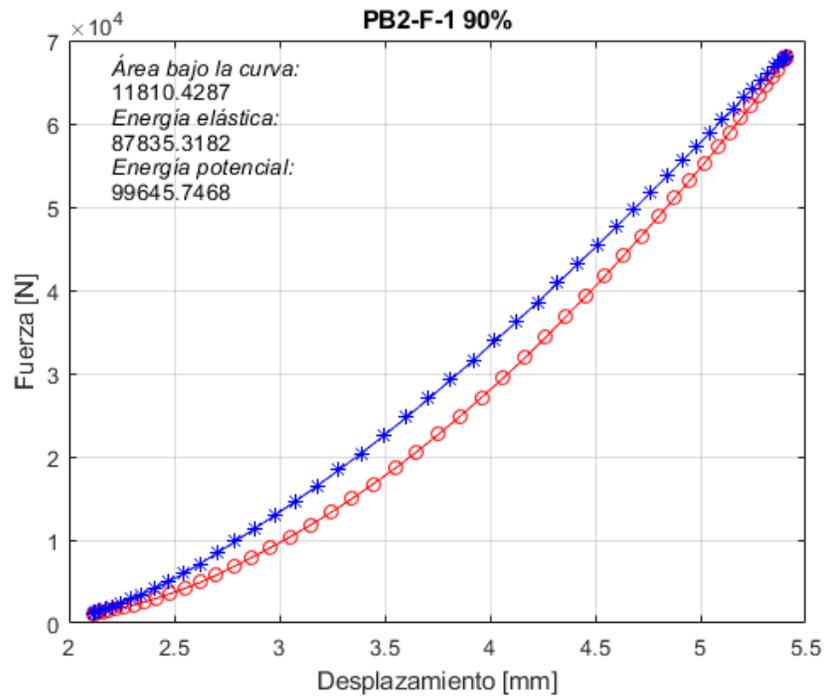


a)

CONTINÚA



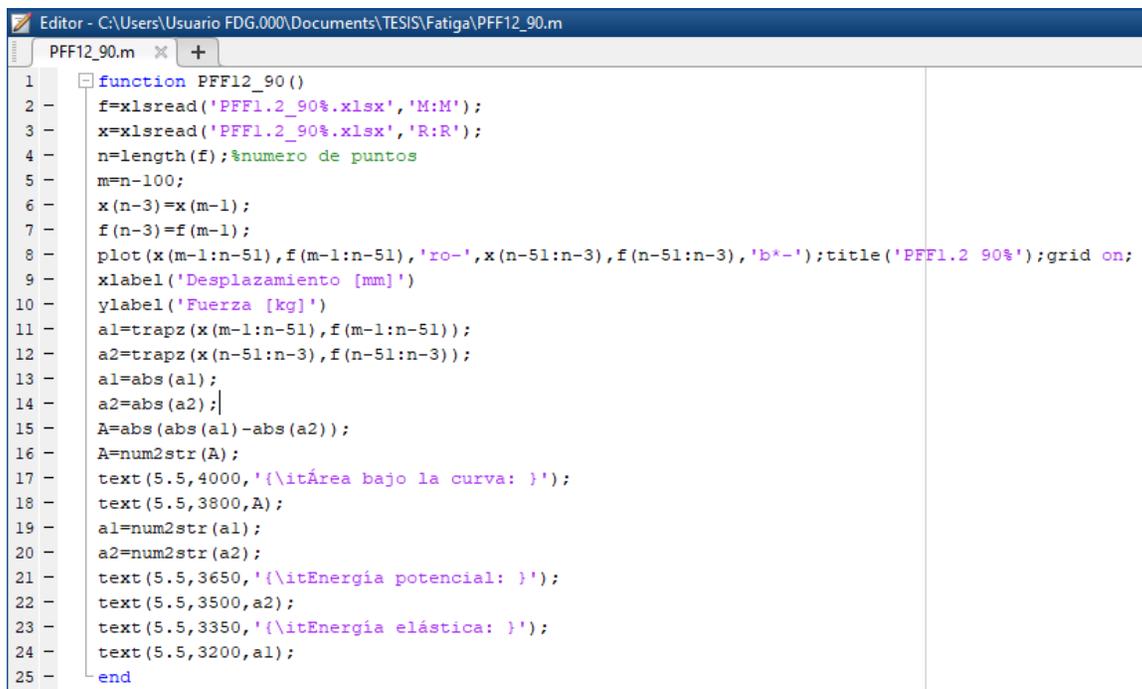
b)



c)

Figura 36. Lazo de histéresis prototipo 2 a)55%
 b) 70% y c) 90%

La energía disipada E_d se calculó mediante el método discreto de integración numérica trapezoidal en el software MATLAB® mediante la función **trapz** cuya aplicación se muestra en la **Figura 37**.



```

1 function PFF12_90()
2     f=xlsread('PFF1.2_90.xlsx','M:M');
3     x=xlsread('PFF1.2_90.xlsx','R:R');
4     n=length(f);%numero de puntos
5     m=n-100;
6     x(n-3)=x(m-1);
7     f(n-3)=f(m-1);
8     plot(x(m-1:n-51),f(m-1:n-51),'ro-',x(n-51:n-3),f(n-51:n-3),'b*-');title('PFF1.2 90%');grid on;
9     xlabel('Desplazamiento [mm]')
10    ylabel('Fuerza [kg]')
11    a1=trapz(x(m-1:n-51),f(m-1:n-51));
12    a2=trapz(x(n-51:n-3),f(n-51:n-3));
13    a1=abs(a1);
14    a2=abs(a2);
15    A=abs(abs(a1)-abs(a2));
16    A=num2str(A);
17    text(5.5,4000,'\itÁrea bajo la curva: ');
18    text(5.5,3800,A);
19    a1=num2str(a1);
20    a2=num2str(a2);
21    text(5.5,3650,'\itEnergía potencial: ');
22    text(5.5,3500,a2);
23    text(5.5,3350,'\itEnergía elástica: ');
24    text(5.5,3200,a1);
25    end

```

Figura 37. Método de integración trapezoidal para cálculo de áreas dentro la curva

La **Tabla 4** muestra los resultados de energía disipada E_d y factor de pérdida η para cada estado de carga de la muestra de ambos prototipos.

En la **Tabla 5** se especifica el número de ciclos que resistió cada muestra hasta presentar falla, a excepción de las muestras PB2-F-1 55% y PB2-F-2 55% que no presentaron falla y alcanzaron el número máximo de ciclos permitidos por tiempo de uso del equipo fijado en 10^5 ciclos.

En la **Figura 38** se observa el diagrama Resistencia a la flexión por fatiga vs número de ciclos, **S-n**, para el prototipo 2.

Tabla 4*Valores de energía disipada y factor de pérdida*

PROTOTIPO 1			PROTOTIPO 2		
MUESTRA	E_d	η	MUESTRA	E_d	η
PB1-F-1 55%	3067.0823	0.0254	PB2-F-1 55%	2722.0083	0.0131
PB1-F-2 55%	3854.0055	0.0289	PB2-F-2 55%	2599.344	0.0129
PB1-F-1 70%	10662.2325	0.0468	PB2-F-1 70%	5925.091	0.0293
PB1-F-2 70%			PB2-F-2 70%	12399.7065	0.0228
PB1-F-1 90%	17003.2847	0.0379	PB2-F-1 90%	11810.4286	0.0189
PB1-F-2 90%	16106.3269	0.0471	PB2-F-2 90%	13215.4269	0.0221

Tabla 5*Número de ciclos resistidos por las muestras prototipos 1 y 2*

Prototipo 1		Prototipo 2	
Muestra	Número de ciclos	Muestra	Número de ciclos
PB1-F-1 90%	70	PB2-F-1 90%	1230
PB1-F-2 90%	70	PB2-F-2 90%	60
PB1-F-1 70%	70	PB2-F-1 70%	41000
		PB2-F-2 70%	6936
PB1-F-1 55%	145	PB2-F-1 55%	100000
PB1-F-2 55%	145	PB2-F-2 55%	100000

Como se menciona en capítulo I, los prototipos de tablero estructural están proyectados a usarse en zonas de alto riesgo sísmico, y basándonos en los resultados del ensayo de flexión a fatiga, se sometió a los posteriores ensayos programados únicamente al prototipo 2.

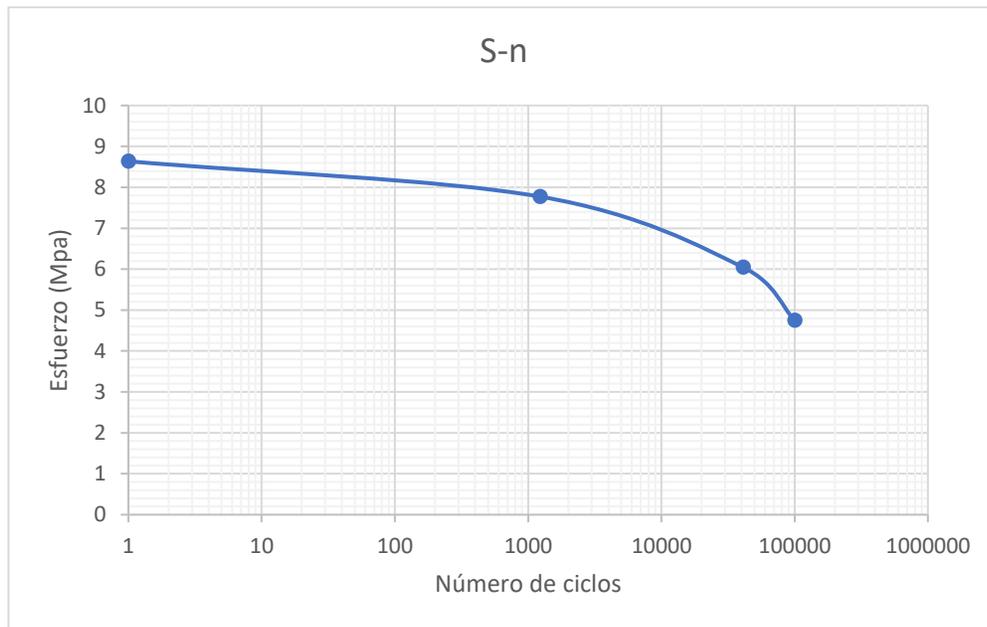


Figura 38. Gráfico S-n prototipo 2

3.2. Ensayo de Vibración Transversal en viga cantiléver

Este ensayo tiene como finalidad el encontrar la frecuencia natural de vibración de vigas de tablero sándwich usando la configuración de viga en cantiléver como se muestra en la **Figura 39**.



Figura 39. Ensayo de Vibración Transversal

3.2.2. Preparación de muestras

Se procedió al armado de vigas que superan los 4000 mm de largo con un ancho de 40 mm y un espesor de 74 mm correspondiente al prototipo 1 esto debido a la mayor factibilidad de fabricación y de obtención de resultados, puesto que para el mayor espesor en el caso del prototipo 2 se necesitaba un armado de vigas que superen los 8 metros de largo lo cual no era viable en su fabricación ni en la manipulación al momento de realizar las mediciones.

La identificación se llevó acabo de la misma manera que en las muestras de fatiga con la variante que el tercer digito es la letra “V” ya que se hace alusión al ensayo de vibración.

Se tomo un total de 5 muestras a ensayar, cada muestra se las obtuvo de cortar vigas cortas de 40 mm de ancho por 1200 mm de largo de paneles de 1200 mm x 600 mm x 74 mm, para su posterior ensamble.

En la **Tabla 6** se describe las medidas de cada una de las muestras a ensayar.

Tabla 6

Medidas de muestras ensayo de vibración

Muestra	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor[mm]
PB1-V-1	4525.00	51.98	76.50
PB1-V-2	4330.00	40.10	78.01
PB1-V-3	4355.00	40.70	76.71
PB1-V-4	4365.00	40.50	78.10
PB1-V-5	4385.00	40.70	77.90

3.2.3. Desarrollo del ensayo

Para el desarrollo del ensayo en cuestión se necesitó de las instalaciones del Laboratorio de Manufactura de Materiales en donde se utilizó la prensa hidráulica manual marca Compac para la correcta sujeción de la mordaza de mismo modo para evitar vibraciones ya que esta actúa como el empotramiento. El sistema de adquisición de datos se lo obtuvo del Laboratorio de Reología, sistema que se centra en la obtención de datos mediante un acelerómetro y USB-6008 y los procesa

mediante el uso de la transformada rápida de Fourier la misma que permite que los datos obtenidos por el sean analizados. Esta es una herramienta matemática es fundamental para el análisis de cualquier señal periódica ya que facilita el estudio de las frecuencias que se producen en un cierto fenómeno vibratorio, y de esta manera hallar la frecuencia fundamental o natural que lo gobierna. Para asegurar el primer modo de vibración y su frecuencia natural se respeta parámetros de longitud y espesor mencionados anteriormente y se mantiene una vibración libre y la frecuencia natural más baja.

Para la elaboración del ensayo se siguió los siguientes lineamientos:

- Se calculó el factor de corrección para las vigas:

Tabla 7
Factor de corrección

Muestra	t [mm]	l [mm]	Factor de corrección
PB2-V-1	76,50	4525	0,0049
PB2-V-2	78,01	4330	0,0052
PB2-V-3	76,71	4355	0,0051
PB2-V-4	78,10	4365	0,0052
PB2-V-5	77,90	4385	0,0051

Como se puede observar todas las vigas cumplen con la condición del factor de corrección por lo cual su valor es 1.

- Se asegura la mordaza en la prensa hidráulica.
- Colocamos la viga en la mordaza donde se sujetó mediante pernos.
- Se procedió a colocar un nivel en la parte superior de la viga para verificar su correcto posicionamiento, en caso de no estar nivelada se van apretando los pernos ubicados en la mordaza hasta que esta quede correctamente alineada.

- El acelerómetro se ubicó en el extremo libre de la viga a una distancia de 100 mm y se sujetó mediante cinta doble faz, además es pertinente que el cableado que corresponde a la parte de adquisición de datos esté ubicado correctamente para que no exista errores en la toma de datos.
- Se realizaron dos mediciones por cada viga, la primera que consta en dejar caer un peso a una cierta altura sobre el extremo libre y la segunda en la cual se procedió a dar un golpe arbitrario en el sitio descrito anteriormente.

La caída del peso influía en la viga una fuerza de:

$$F = m \times a$$

$$F = 0.52279 \text{ kg} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 5.13 \text{ N}$$

- La recolección de datos se la realizó hasta que la vibración de la viga sea despreciable.

3.2.4. Resultados

A partir de la **Figura 40** hasta la **Figura 43** se ilustra el espectro de frecuencias para las muestras sometidas a vibración con excitación por caída de masa y excitación por golpe, a excepción de la muestra PB1-V-4 que sufrió fractura y no permitió la recolección de datos. De la **Figura 44** a **Figura 46** se muestra la falla ocurrida en la muestra PB1-V-4.

Tabla 8.

Frecuencias y variación

Muestra	Excitación	Excitación	Variación
	caída de	de golpe	
	peso		
	Frecuencia	Frecuencia	%
	[Hz]	[Hz]	
PB1-V-1	2.846	2.833	0.46
PB1-V-2	3.167	3.273	3.35
PB1-V-3	3.091	3.182	2.94
PB1-V-4	-	-	-
PB1-V-5	3.091	3.091	0.00

En la **Tabla 8** se muestran los resultados de las frecuencias naturales y su variación acorde al tipo de excitación.

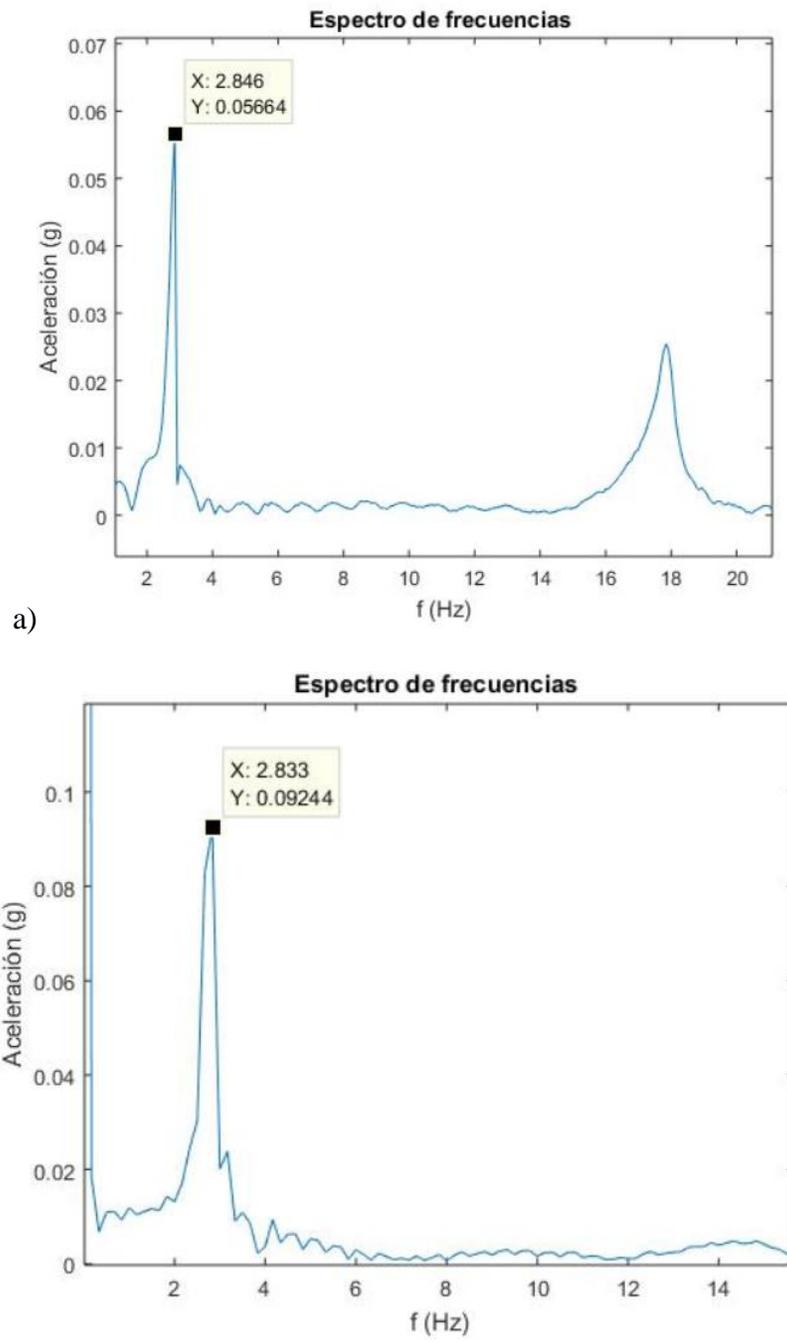


Figura 40. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-1
a) excitación de caída de peso y b) con excitación de golpe

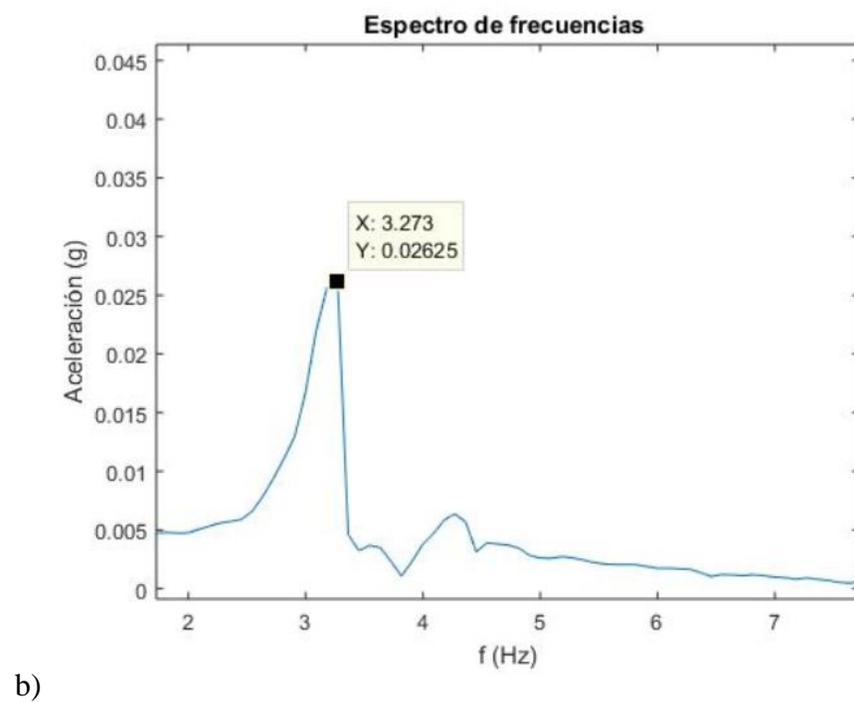
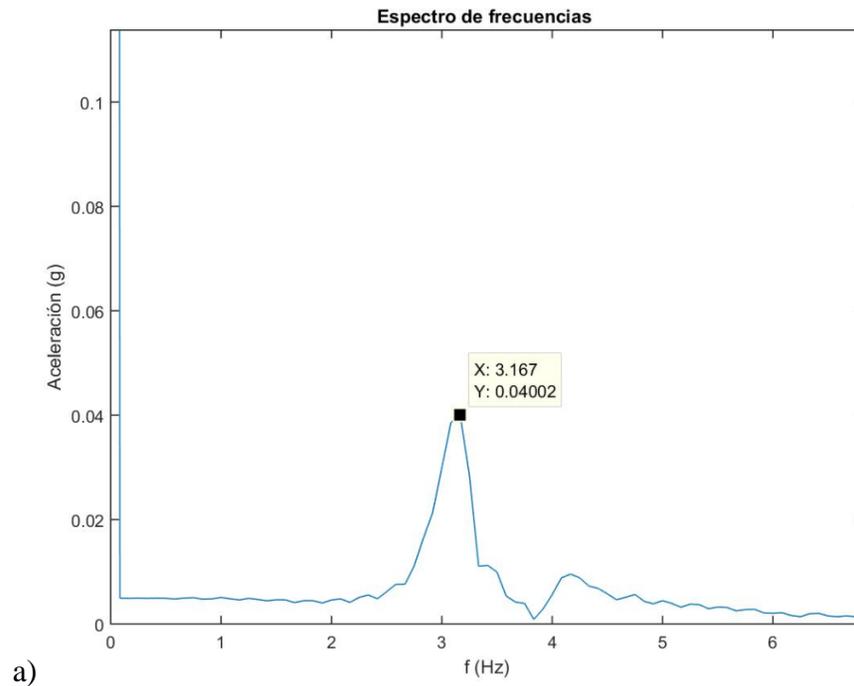


Figura 41. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-2 con a) excitación de caída de peso y b) excitación de golpe

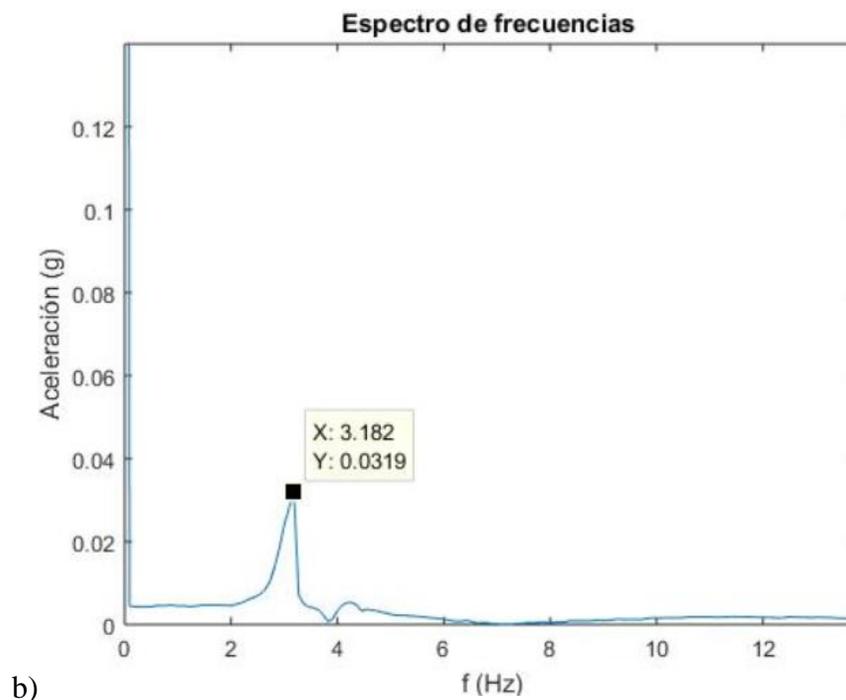
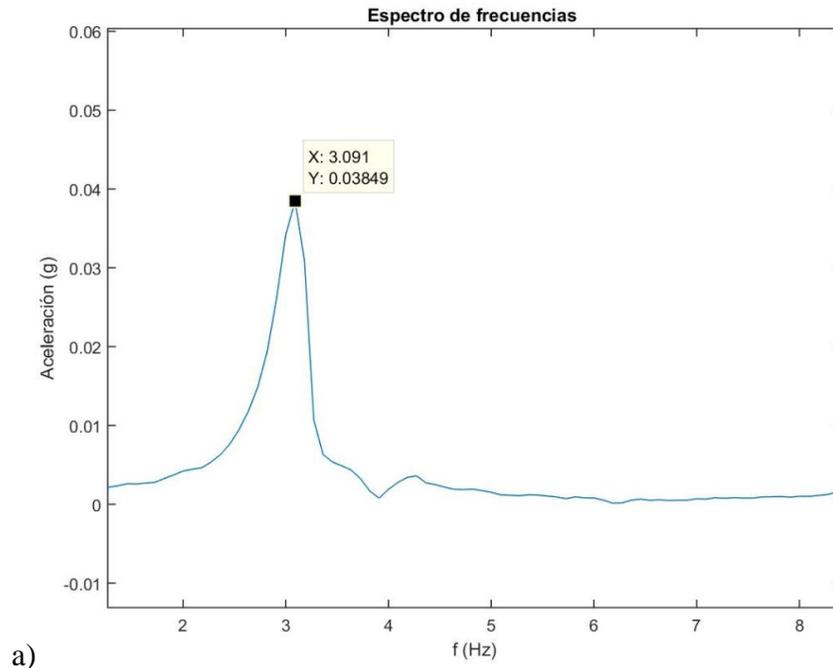
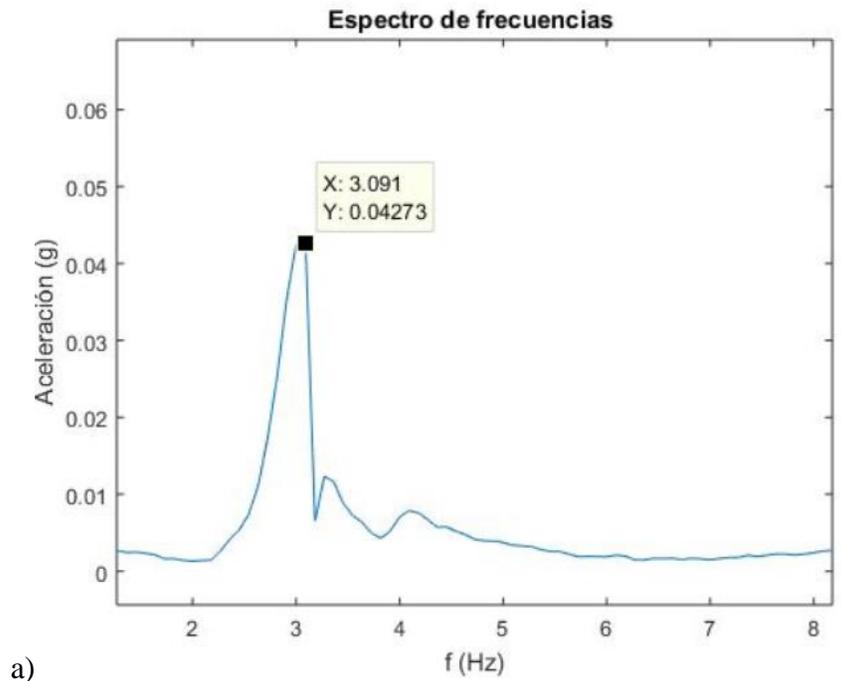
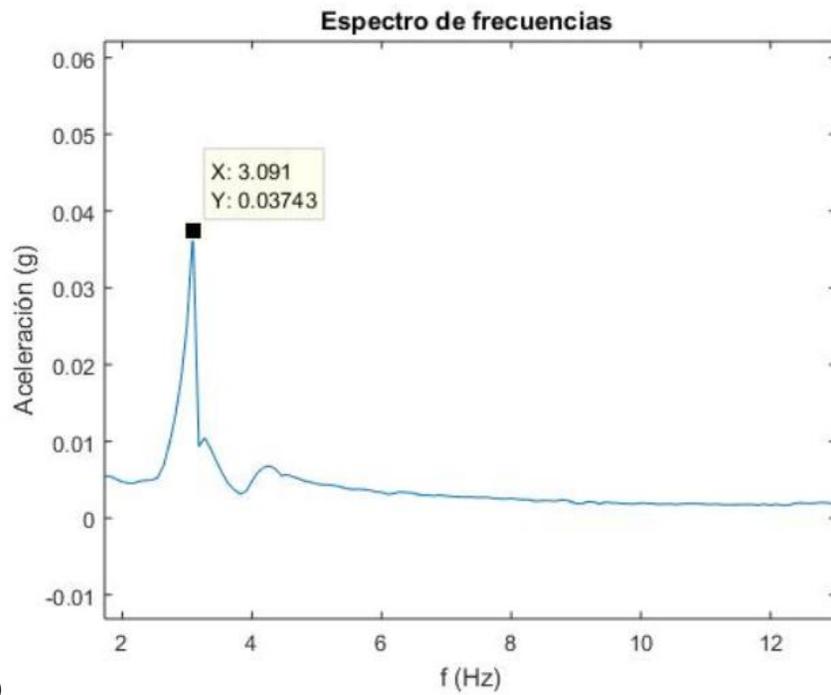


Figura 42. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-3 con a) excitación de caída de peso y b) con excitación de golpe



a)



b)

Figura 43. Grafica del Espectro de frecuencias PB1-V-5 con
a) excitación de caída de peso y b) excitación de golpe



Figura 44. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista lateral izquierda



Figura 45. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista lateral derecha



Figura 46. Falla de viga al momento de aplicar la fuerza vista superior

3.3. Ensayo de Conductividad Térmica

Se tomó como referencia el estándar ASTM C177 con la finalidad de obtener el coeficiente de conducción de las muestras.



Figura 47. Ensayo de Coeficiente de Conducción

3.3.2. Preparación de Muestras

Acorde a la norma ASTM C177-13 y ajustándonos a las dimensiones de la placa caliente y guarda diseñadas para el equipo, las muestras fueron cortadas a las dimensiones mostradas en la **Tabla 9**. Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código de 5 dígitos, iniciando con **PB2** denotando “prototipo de bambú 2” seguido de la letra **C**, culminando con el número de probeta.

Tabla 9
Medidas de las muestras ensayo de conducción térmica

Muestra	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
PB2-C-1	248.00	248.00	122.20
PB2-C-2	248.00	251.00	123.30
PB2-C-3	247.00	251.00	122.50
PB2-C-4	247.00	252.00	123.00
PB2-C-5	248.00	252.00	124.00
PB2-C-6	247.00	251.00	123.00

3.3.3. Desarrollo del Ensayo

Para la elaboración del ensayo se utilizó el dispositivo para medición de conductividad térmica disponible en el Laboratorio de Conversión de la Energía que se muestra en la **Figura 47**. Acorde a la norma ASTM C177 y por el diseño del dispositivo utilizado se dispuso la configuración de doble lado, evaluando 2 muestras por cada ensayo.

En la elaboración de ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

- En primer lugar, se enciende el sistema de refrigeración que actúa en la placa fría y se lo regula a la medida deseada, estableciéndose en 6°C que es la temperatura más baja alcanzada por el sistema de refrigeración.
- Ubicamos las probetas en posición centrada a ambos lados de la placa caliente con la ayuda de un posicionador, posteriormente se las ajusta mediante la prensa con una fuerza suficiente para que las caras de las muestras queden en contacto con las caras de la placa fría y placa caliente.
- Colocamos y aseguramos las tapas de ingreso de muestras y de ajuste de prensa, para poder alcanzar la presión de vacío dentro de la campana.
- Seguidamente se enciende las resistencias y se ubica el voltaje tanto para la placa caliente como para la guarda, hasta alcanzar la temperatura de 28°C, recomendada para precautelar la vida útil de la placa caliente.
- Encendemos la bomba de vacío, para evitar la transferencia de calor por convección, y se la mantiene encendida un transcurso de dos horas en las cuales se produce un vacío dentro de la cabina, aproximadamente de 5 psi.
- Permitimos el funcionamiento ininterrumpido del dispositivo hasta alcanzar un estado estable, se estima un tiempo de 12 a 16 horas.
- Una vez en equilibrio se registran los datos de temperatura y voltaje cada 30 min hasta completar un total de 10 mediciones.

3.3.4. Resultados

Los datos registrados de temperaturas de placa caliente y placa fría y voltajes están tabulados en el anexo 1.

En la **Tabla 10** se muestran los coeficientes de conductividad térmica para las muestras ensayadas.

Tabla 10

Coefficiente de conductividad térmica y resistencia térmica

Muestra	Q [W]	ΔT [K]	λ_{prom} [W/m. K]	R_{prom} [m ² K/W]
PB2-C-1	0.588	17.8	0.0317	3.885
PB2-C-2				
PB2-C-3	0.588	20.6	0.0300	4.100
PB2-C-4				
PB2-C-5	0.588	18.1	0.0332	3.707
PB2-C-6				
Promedio			0.0316	3.8975

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo del coeficiente de conductividad térmica y resistencia térmica para la muestra PB2-C-1.

$$Q_T = P = \frac{V^2}{R_p} = \frac{7.4^2 [V]}{96[\Omega]} = 0.588 [W]$$

Donde R_p es el valor de la resistencia instalada en la placa caliente con un valor de 96 Ω .

El coeficiente de conductividad térmica λ se lo obtiene mediante la fórmula:

$$\lambda = \frac{Q * t}{A * \Delta T}$$

$$\lambda = \frac{\frac{Q_T}{2} * t}{A_s * \Delta T} = \frac{\frac{0.588}{2} [W] * 0.1222[m]}{0.248 * 0.248[m^2] * 17.8[K]} = 0.0328 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$R = \frac{t}{\lambda} = \frac{0.1222[m]}{0.0328 \left[\frac{W}{m K} \right]} = 3.725 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

3.4. Ensayo de Coeficiente de Absorción de Energía Acústica

Se tomó como referencia la ASTM E1050 para la obtención del coeficiente de absorción de energía acústica (SAC) del prototipo 2.



Figura 48. Ensayo de Coeficiente de absorción de energía acústica

3.4.2. Preparación de muestras

Como lo menciona la norma ASTM E1050 las muestras tienen concordancia con la dimensión del diámetro interno del tubo de la máquina disponible, con un valor de 34.9 mm, para la obtención de estos cilindros se tomaron cuadrados de 50 mm x 50 mm x espesor del prototipo 2, las cuales posteriormente fueron torneados hasta llegar a las medidas del diámetro interior, de igual forma la

identificación se mantuvo en un código de 5 dígitos, con la variante del tercer dígito al cual se le asigna la letra “S” correspondiente a sonido como se muestra en la **Figura 49**.



Figura 49. Muestras con identificación para ensayo acústico

Las medidas de las muestras se indican en la **Tabla** .

Tabla 11

Medidas de las muestras para sonido

Muestra	Diámetro	Espesor
	[mm]	[mm]
PB2-S-1	34.8	126
PB2-S-2	34.8	125.5

3.4.3. Desarrollo del Ensayo

El ensayo fue desarrollado en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Acústica y Sonido de la Universidad de las Américas UDLA. El equipo utilizado fue un tubo de impedancia marca ACUPRO junto a su software de adquisición y análisis de datos como se muestra en la **Figura 48**, las instalaciones del laboratorio tienen condiciones de aislamiento acústico para que no exista

ningún tipo de interferencia en el momento de las mediciones, esto proporciona una medida de seguridad adicional, ya que el tubo cuenta con el espesor suficiente para que no exista interferencia del entorno en sus mediciones.

El ensayo se desarrolló de la siguiente manera:

- Como primer paso se procede a la calibración de los dos micrófonos utilizados por la máquina, este procedimiento se lo realiza a través del software ACUPRO y se lo realizó un micrófono a la vez, la distancia de separación entre los micrófonos fue de 29.21 mm.
- El montaje de las muestras se lo realizó respetando los comentarios dispuestos por la ASTM E1050, los cuales establecen que no exista protuberancias por exceso de apriete entre la muestra y de igual forma que no exista holguras o grietas en los bordes.
- Se ubica el portamuestras en la parte final del tubo de impedancia y se lo fija mediante el uso de pernos Allen.
- Se envía la señal incidente mediante el software ACUPRO y se espera alrededor de 1 minuto, tiempo promedio para la culminación del ensayo.
- Se obtiene los datos en el software de ACUPRO correspondientes al coeficiente de absorción de energía acústica (SAC) para cada banda de 1/3 de octava.

3.4.4. Resultados

La **Tabla 12** muestra los valores de SAC para las muestras del prototipo 2 obtenidos mediante en ensayo.

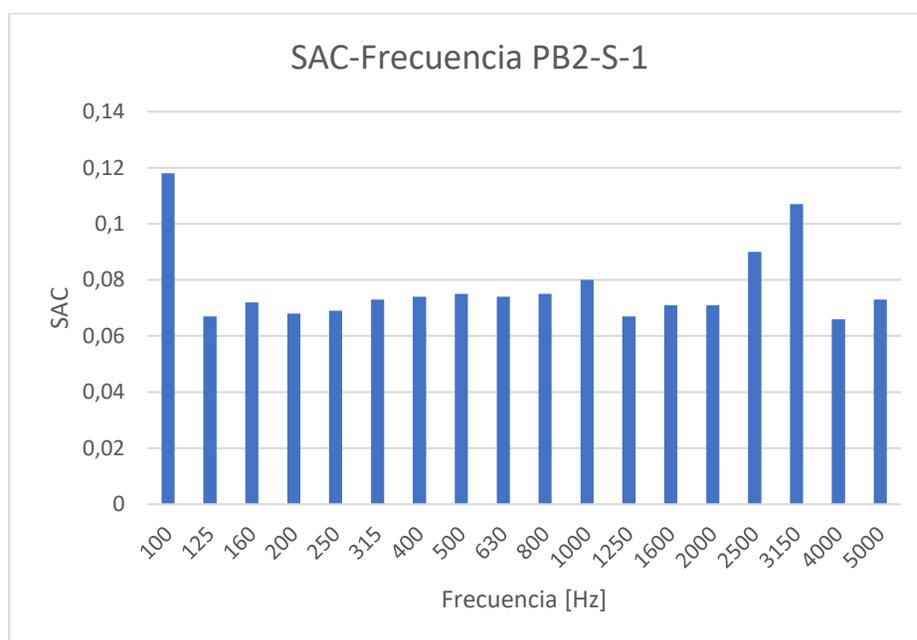
Tabla 12

Promedio del Coeficiente de Absorción de Sonido en Banda de 1/3 de Octava:

Prototipo PB2-S-1		Prototipo PB2-S-2	
Frecuencia [Hz]	SAC	Frecuencia [Hz]	SAC
100	0.118	100	0.097

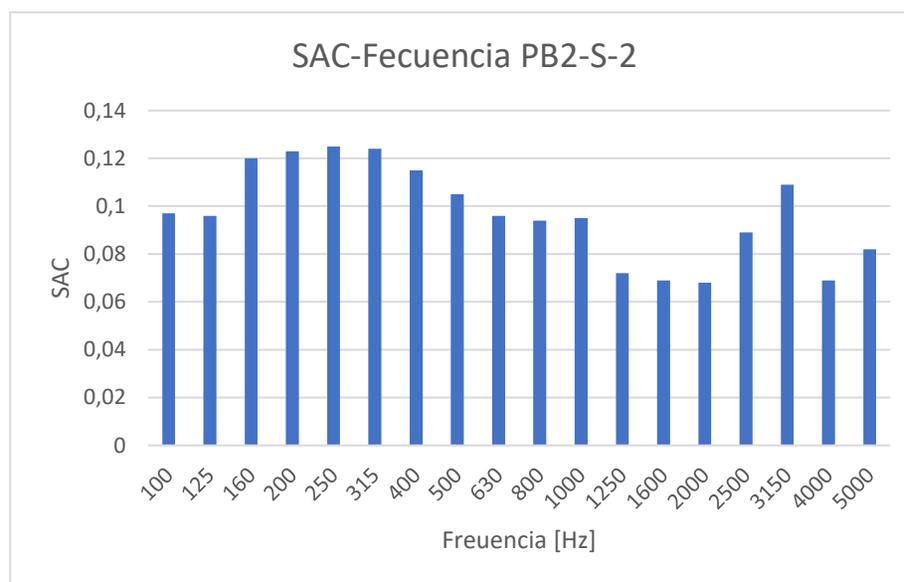
CONTINÚA

125	0.067	125	0.096
160	0.072	160	0.120
200	0.068	200	0.123
250	0.069	250	0.125
315	0.073	315	0.124
400	0.074	400	0.115
500	0.075	500	0.105
630	0.074	630	0.096
800	0.075	800	0.094
1000	0.080	1000	0.095
1250	0.067	1250	0.072
1600	0.071	1600	0.069
2000	0.071	2000	0.068
2500	0.090	2500	0.089
3150	0.107	3150	0.109
4000	0.066	4000	0.069
5000	0.073	5000	0.082



a)

CONTINÚA



b)

Figura 50. Gráfico SAC – Frecuencia a) muestra PB2-S-1 y b) PB2-S-2

En la **Figura 50** se muestran la evolución de SAC para las diferentes bandas de octava.

3.5. Ensayo de Comportamiento al Fuego

Se tomó como referencia la norma ASTM E2707-15, para las dimensiones en las muestras se tomaron dos tableros estructurales completos como se muestra en la **Figura 51** y no se siguió las recomendaciones establecidas por la norma al no tener el material suficiente para el armado de las muestras, este ensayo tiene como objetivo comprobar la respuesta al fuego de un panel sin recubrimiento ignífugo y uno con recubrimiento ignífugo para realizar una comparación y comprobar la utilidad y beneficio de la aplicación de este tipo de recubrimiento.

3.5.2. Preparación de muestras

Como se explicó anteriormente se tomaron dos tableros estructurales completos a ensayar, para La muestra PB2-FG-1 a la cual se aplicó la protección ignífuga se siguió el siguiente procedimiento:

- Limpieza de la cara en donde se aplicó el recubrimiento ignífugo para que no exista ningún material contaminante. El recubrimiento ignífugo utilizado fue el barniz Montofoc de Pintulac.
- Se procede a aplicar la primera mano y se deja secar por el lapso de 6 horas siguiendo la recomendación del fabricante, el mismo procedimiento se realizó para las dos manos restantes lo cual da un total de 3 manos de recubrimiento ignífugo.



Figura 51. Ensayo de Comportamiento al Fuego

- Se dejó secar y se procedió a realizar el método de prueba.
Hay que mencionar que en el proceso de fabricación de las caras de bambú son tratadas con bórax el cual proporciona propiedades ignífugas, es decir existe ya una protección ignífuga inherente en el método constructivo de los tableros estructurales.

Como se puede observar en la **Figura 52** el recubrimiento ignífugo aparte de propiedades ignífugas brinda un acabado más vistoso comparado al tablero al cual no se le realizó ningún procedimiento.

La denominación sigue dada por los 5 dígitos en donde su única variación es el tercer dígito en donde se lo representa con las letras “FG” con respecto a fuego.

Las muestras tienen las siguientes dimensiones:

Tabla 13

Dimensiones de las muestras

Muestra	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
PB2-FG-1	1179.00	589.00	123.10
PB2-FG-2	1777.00	588.00	122.70



Figura 52. A la izquierda tablero con recubrimiento ignífugo y a la derecha tablero en condiciones normales.

3.5.3. Desarrollo del Ensayo

Fueron necesarias las instalaciones del Laboratorio de Procesos de Manufactura por contar con los extractores de humo necesario para un desarrollo eficaz del ensayo, además fue necesario un quemador a base de GLP como fuente de llama y se siguió los siguientes pasos:

- Realizamos el posicionamiento del quemador para que se encuentre en el centro de gravedad de los tableros estructurales.
- Los tableros fueron ubicados en un soporte y se controló que las fibras se encuentren en forma longitudinal como lo recomienda la norma.
- Se midió una distancia entre el quemador y el centro de gravedad de los tableros correspondiente a 300 mm para el correcto funcionamiento del quemador.
- Se enciende el sistema de extracción de humo para evitar posibles inhalaciones por parte de los tesisistas y de las personas presentes en el laboratorio.



Figura 53. Puntos en donde se tomaron las temperaturas durante el ensayo

- El quemador es encendido mediante el uso de un pedernal y se controla su potencia mediante el cierre del paso de GLP.
- Se toma medidas cada 5 min en los puntos 1, 2, 3 y 4 que están representados en la **Figura 53** el punto 5 se encuentra en la boquilla del quemador.

- Se concluyó el ensayo en el transcurso de 2 horas, no se siguió la recomendación de la norma ya que en la 1 hora de ensayo no se registraron eventos de significativa importancia.

3.5.4. Resultados

En la **Tabla 14** y **Tabla 15** se muestran los datos de temperatura y tiempo obtenidos del ensayo para el prototipo con protección ignífuga y sin protección ignífuga respectivamente.

Tabla 14

Datos de tiempo y temperatura en puntos de control muestra PB2-FG-1

Tiempo [min]	Punto 1 [°C]	Punto 2 [°C]	Punto 3 [°C]	Punto 4 [°C]	Punto 5 [°C]
5	37.50	71.40	31.30	23.20	173.60
10	42.00	93.00	31.30	23.21	173.40
15	45.00	104.10	31.30	23.20	179.60
20	46.00	94.40	33.50	23.20	182.50
25	46.00	102.60	34.70	24.20	182.10
30	48.90	108.60	34.30	24.20	182.10
35	48.60	110.90	38.40	25.40	180.20
40	49.90	112.40	41.10	27.40	184.20
45	48.90	116.10	36.30	28.20	187.20
50	52.50	109.90	41.10	33.40	197.00
55	51.00	109.90	41.10	33.40	197.00
60	52.80	99.30	38.80	36.20	187.70
65	53.60	101.40	40.40	38.90	194.10
70	52.00	102.90	41.00	42.00	195.80
75	52.70	110.60	45.40	50.10	185.80
80	55.20	105.50	48.50	53.80	183.00
85	58.40	102.00	47.90	55.70	178.90
90	60.90	110.90	46.70	55.50	193.60
95	61.20	110.20	48.50	57.50	194.00
100	60.40	111.40	47.90	58.00	193.70
105	60.60	106.90	48.90	59.30	187.70
110	60.20	107.90	49.90	59.90	183.50
115	63.70	106.90	44.50	61.40	182.90
120	60.70	106.40	45.20	59.90	181.60

En la **Figura 54** y **Figura 55** se grafican la evolución de la temperatura en la cara no expuesta del prototipo con protección ignífuga y sin protección ignífuga respectivamente.

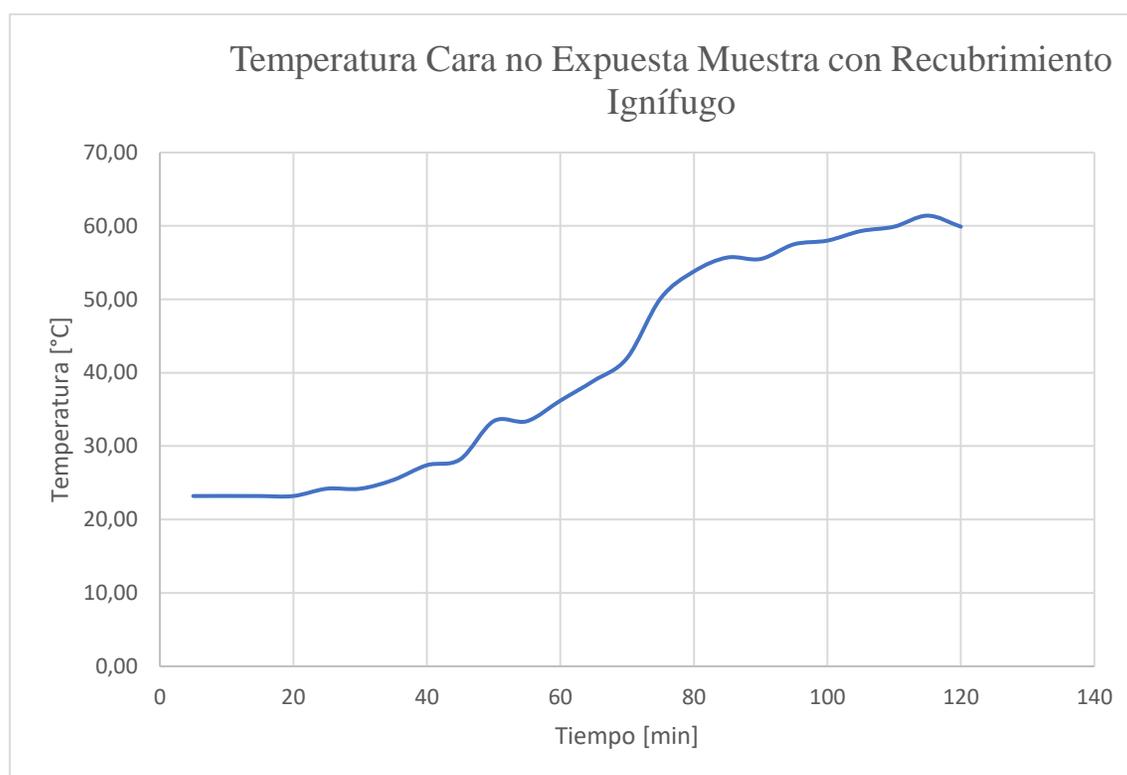


Figura 54. Evolución de la temperatura en la cara no expuesta de la muestra con protección ignífuga respecto al tiempo

Tabla 15

Datos de tiempo y temperatura en puntos de control muestra PB2-FG-2

Tiempo [min]	Punto 1 [°C]	Punto 2 [°C]	Punto 3 [°C]	Punto 4 [°C]	Punto 5 [°C]
5	51.20	47.10	25.80	20.00	181.60
10	53.40	57.70	28.50	23.40	182.90
15	58.10	62.90	32.50	25.10	187.70
20	56.60	64.90	34.00	26.10	193.70
25	59.50	68.10	35.00	27.20	195.60
30	55.50	66.00	35.20	28.50	190.60
35	60.50	66.70	36.40	27.20	187.50
40	58.90	68.20	38.80	31.40	195.80
45	61.10	69.20	40.50	36.50	194.10
50	63.10	69.50	40.10	40.10	197.00
55	70.90	70.00	46.70	48.50	197.70
60	66.60	78.50	47.00	50.70	196.60
65	69.60	84.50	46.60	51.20	184.30
70	69.30	85.10	46.20	52.10	185.00
75	70.00	87.10	44.20	54.10	197.40
80	71.30	79.20	47.00	55.00	195.80
85	70.10	83.50	42.30	57.10	183.80

CONTINÚA

90	76.50	84.30	48.90	65.40	190.00
95	74.10	84.30	49.90	63.10	194.30
100	75.80	82.20	52.00	64.60	182.30
105	75.50	84.30	53.20	60.00	184.50
110	70.40	83.20	52.10	59.70	179.60
115	62.30	76.90	53.00	56.90	176.60
120	63.80	84.20	53.70	59.20	176.30

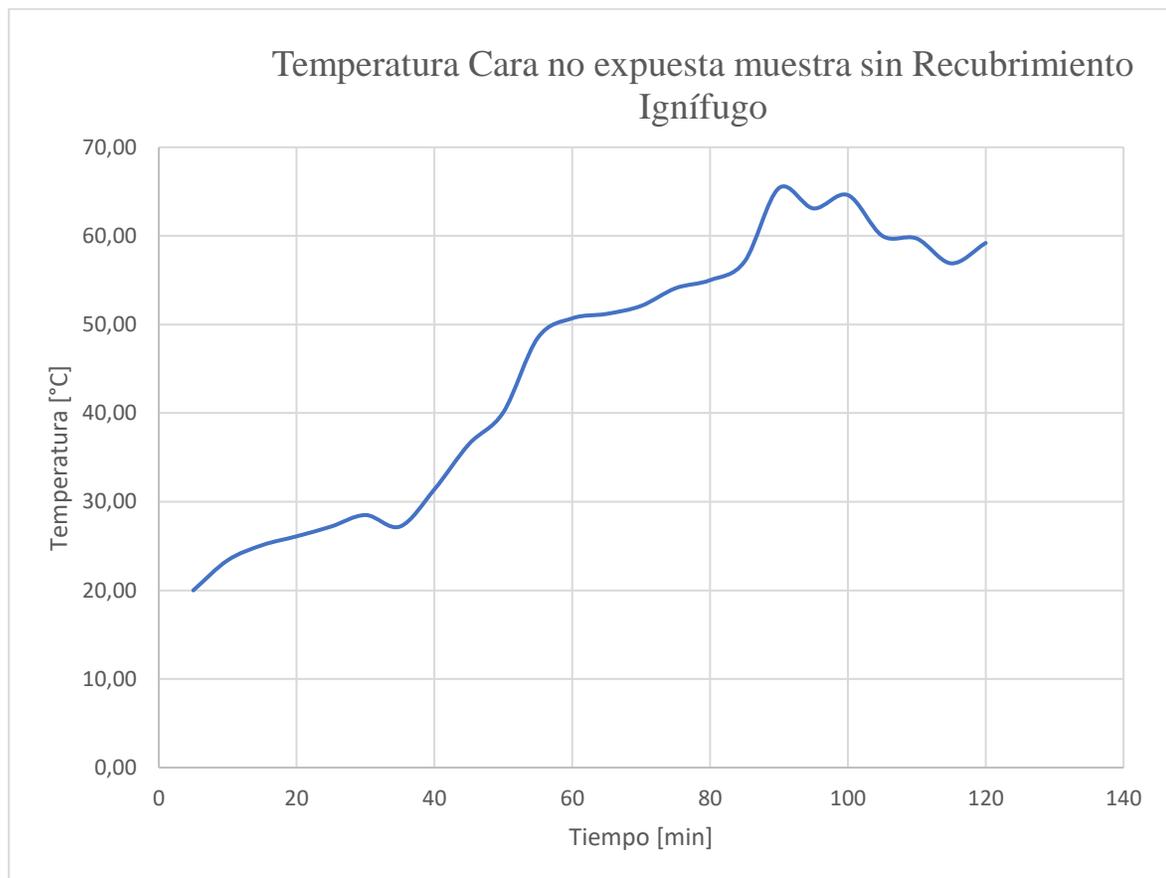


Figura 55. Evolución de la temperatura en la cara no expuesta de la muestra sin protección ignífuga respecto al tiempo

De la **Figura 56** a **Figura 60** se muestran los principales efectos ocurridos durante el ensayo para los prototipos con y sin protección ignífuga.



Figura 56. Presencia de llama por la combustión propia del tablero estructural en muestra PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha).



Figura 57. Cara expuesta al fuego de las muestras PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha) culminado el ensayo



Figura 58. Cara posterior de las muestras PB2-FG-1 (izquierda) y PB2-FG-2 (derecha) culminado el ensayo

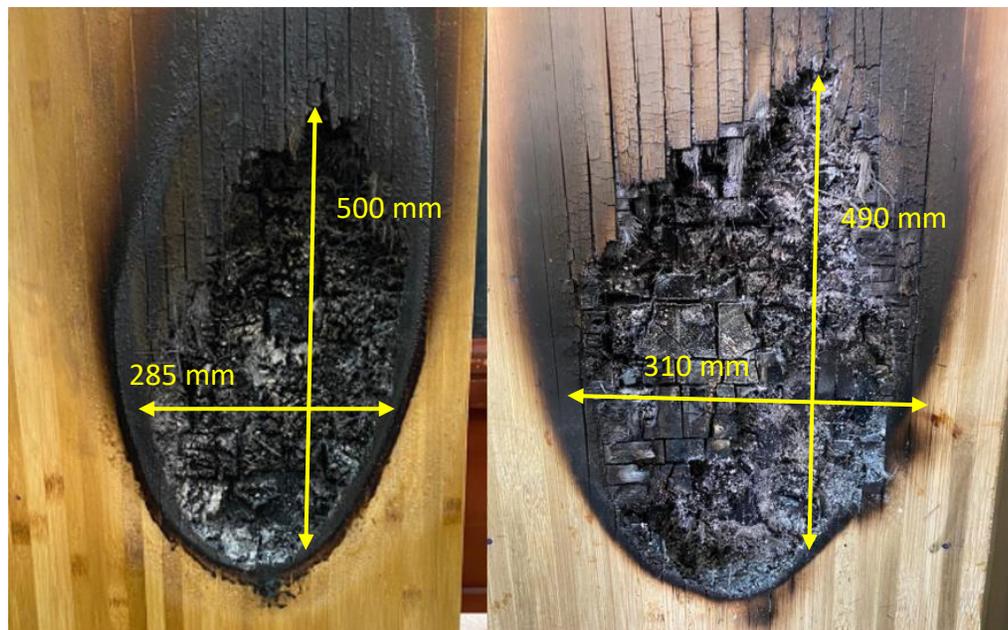


Figura 59. Medidas máximas de la zona de afectación producida por la llama



Figura 60. Comportamiento del recubrimiento ignífugo frente a la llama

En la **Tabla 16** se muestran las coordenadas de los puntos donde se midió la profundidad de consumo de los tableros tomando como origen el extremo inferior izquierdo de la cara expuesta al fuego, se facilita su comprensión con la **Figura 61**.

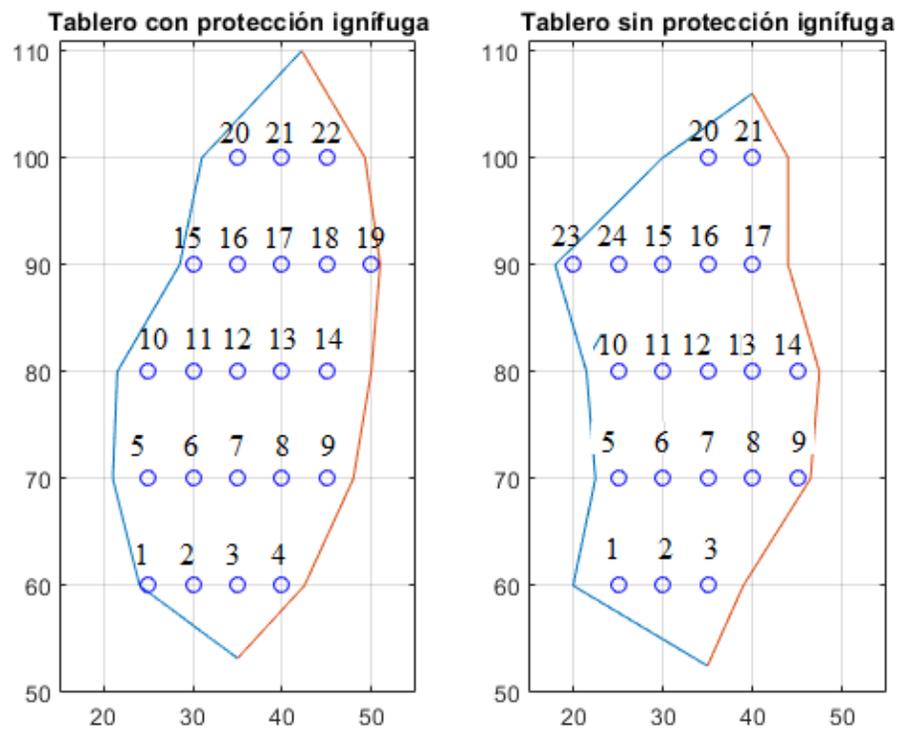


Figura 61. Esquema de puntos para medición de profundidad

Tabla 16.
Coordenadas de puntos para medición de profundidad

PUNTO	X (cm)	Y (cm)	Profundidad de consumo del tablero	
			con protección (cm)	sin protección (cm)
1	25	60	9.52	9.37
2	30	60	10.63	9.72
3	35	60	10.63	10.9
4	40	60	10.63	-
5	25	70	9.3	2.22
6	30	70	9.69	2.41
7	35	70	6.78	10.56
8	40	70	6.59	11.8
9	45	70	5.33	11.4
10	25	80	5.2	4.45
11	30	80	7.8	2.8
12	35	80	8.71	5.54
13	40	80	10.25	10.33
14	45	80	8.55	10.73
15	30	90	7.87	8.16
16	35	90	7.54	9.35
17	40	90	7.96	5.31
18	45	90	9.47	-
19	50	90	8.15	-
20	35	100	9.45	6.66
21	40	100	9.77	4.73
22	45	100	9.2	-
23	20	90	-	6.73
24	25	90	-	8.04

CAPITULO IV

ANALISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Ensayo de Fatiga

4.1.2. Análisis

Como se muestra en el Capítulo III, **Figura 38**, el diagrama toma en cuenta únicamente los valores máximos del prototipo 2, ya que los valores mínimos fallaron antes de alcanzar los estados máximos y mínimos establecidos para su ensayo, al igual que todas las muestras del prototipo 1. Este hecho se logró evidenciar debido al aumento gradual de la fuerza aplicada por la máquina como se aprecia en la **Figura 62**.

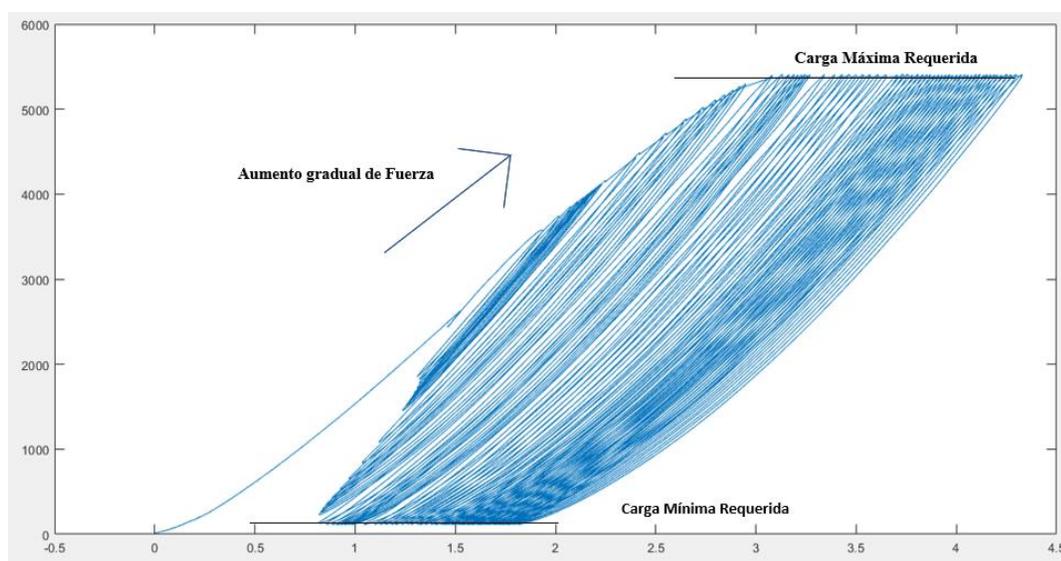


Figura 62. Aumento gradual de fuerza producida por la máquina

Un comportamiento similar ocurre en el análisis de la energía, como se mencionó las muestras no llegan a las condiciones requeridas de carga, razón por la cual no permite un análisis correcto y deja como única alternativa viable las muestras del prototipo 2 con mayor ciclaje.

Se evidenció dos tipos de fallas propias del ensayo, la primera es la falla por cortante en el núcleo, presente en la totalidad de las muestras excepto las muestras PB2-F-1 55% y PB2-F-2 55%, y es considerada como la falla típica y se la puede observar en la **Figura 63** y la segunda que sucede en la capa intermedia de las caras donde se evidencia de igual forma el fallo por cortante, esto debido a su disposición ortogonal a las capas superior e inferior y estando presente específicamente en las muestras PB1-F-1 90% y PB1-F-2 90% del prototipo 1, la falla se observa en la **Figura 64**.



Figura 63. Falla por cortante en el núcleo



Figura 64. Falla por cortante capa intermedia de las caras

Conjuntamente, se observaron fallas producidas por el método de construcción de los tableros estructurales, específicamente por la no homogeneidad de la presión al momento del pegado y la distribución no uniforme del ligante, lo que produjo una mala adherencia ciertas zonas de la interfaz cara-núcleo resultando en un deslizamiento parcial de los mismos, como se lo puede observar en la **Figura 65**.



Figura 65. Deslizamiento entre el núcleo y las caras por falta de presión y adhesión

Como se mencionó anteriormente existe una falla en el núcleo, pero esta no es una falla total del tablero estructural, es decir, el tablero conserva cierto grado de resistencia debido a que sus caras no presentan fallas y siguen adheridas al núcleo lo cual evitaría el volcamiento de la mampostería.

Como se muestra en la **Tabla 4** la mayor disipación de energía se da en los porcentajes de carga más altos, pero se tiene como limitante el número de ciclos, mientras que para carga más bajas el número de ciclos alcanza valores más altos, dando como resultado un mejor comportamiento para zonas de alto riesgo sísmico.

En la **Figura 38** el gráfico S-n para el prototipo 2 muestra un comportamiento semejante al gráfico S-n de materiales tradicionales en donde a la disminución progresiva de esfuerzo da como resultado un aumento el número de ciclos.

El prototipo 1 presento una energía disipada nula debido a los altos requerimientos de carga configurados para el ensayo los cuales causaron una falla casi inmediata sin dar la posibilidad de un análisis dinámico.

4.1.3. Comparación

Al presentar propiedades de disipación de energía destacadas frente a materiales tradicionales como el bloque y el ladrillo los cuales presentan bajas o nulas propiedades de disipación de energía lo posiciona como un material idóneo para mampostería en zonas de alto riesgo sísmico.

Otra ventaja esta proporcionada por su bajo peso, pues comparada a mampostería tradicional es 3,37 veces más liviano como lo menciona (Andino, 2019) en su estudio y esta ventaja de peso es aún mayor al ser comparada a mampostería confinada la cual proporcionan propiedades de absorción de energía, a costa del incremento de su peso debido a elementos añadidos como por ejemplo la malla electrosoldada.

Como se mencionó, al permanecer unidas las caras al nucleó se evita el volcamiento, lo cual no sucede con la mampostería tradicional que frente a estímulos dinámicos presenta dicho problema lo cual añade el riesgo de accidentes frente a eventos sísmicos como se puede observar en la **Figura 1**.

4.2. Ensayo de Vibración Transversal en Viga Cantiléver

4.2.2. Análisis

La mala adherencia entre los segmentos que formaron la muestra PB1-V-4 ocasionó que fallara ante la primera forma de excitación como se aprecia en la **Figura 45**.

La **Tabla 8** evidencia que la diferencia de valor de frecuencia para las dos excitaciones no es de significativa importancia, esto debido al cumplimiento de la relación entre la longitud y el espesor que son factores clave en este tipo de ensayos lo cual garantiza la no afectación de fuerzas de corte ni torsión, y que sin importar la fuente generadora de excitación libre la viga siempre vibrará en su modo fundamental.

Se concluyó que la frecuencia está ligada directamente al módulo de elasticidad, por lo cual se podría predecir que para las mismas condiciones de longitud y espesor para el acero su frecuencia fundamental sería más alta que las obtenidas para los tableros mientras que para un material como el caucho su frecuencia natural sería menor.

4.3. Ensayo de Conductividad Térmica

4.3.2. Análisis

Como lo indica la **Tabla 10**, el coeficiente de conductividad térmica tiene un valor de $\lambda=0.0316[W/m K]$ y una resistencia térmica de $R=3.8975 [m^2 K / W]$ para el prototipo 2.

Con el valor de λ obtenido podemos catalogar el prototipo 2 del tablero estructural tipo sándwich como un material aislante, pues su valor se encuentra en el rango de coeficiente de conductividad de materiales típicamente considerados aislantes mostrados en la **Tabla 17**.

Tabla 17.
Coeficiente de conductividad de materiales aislantes

Material	λ [W/m K]
Lana mineral (panel)	0.042
Lana mineral (manta/rollo)	0.038
Poliestireno expandido (EPS)	0.04
Poliestireno extruido (XEPS)	0.035

Espuma de poliuretano	0.025
Espuma de urea formaldehído (UF)	0.04
Fibra de vidrio (panel)	0.046 a 0.048
Lana de roca o lana de escoria	0.033 a 0.037

Fibra de vidrio en spray para cavidades en paredes o áticos 0.033 a 0.040

Fuente: Modificado de (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

Toda la región de la costa ecuatoriana se encuentra catalogada como Zona Húmeda muy calurosa denominada como zona climática 1, como se muestra en la **Figura 66**. Las zonas climáticas húmeda calurosa, continental lluviosa, continental templada, fría y muy fría se denominan zona climática 2, zona climática 3, zona climática 4, zona climática 5 y zona climática 6 respectivamente.

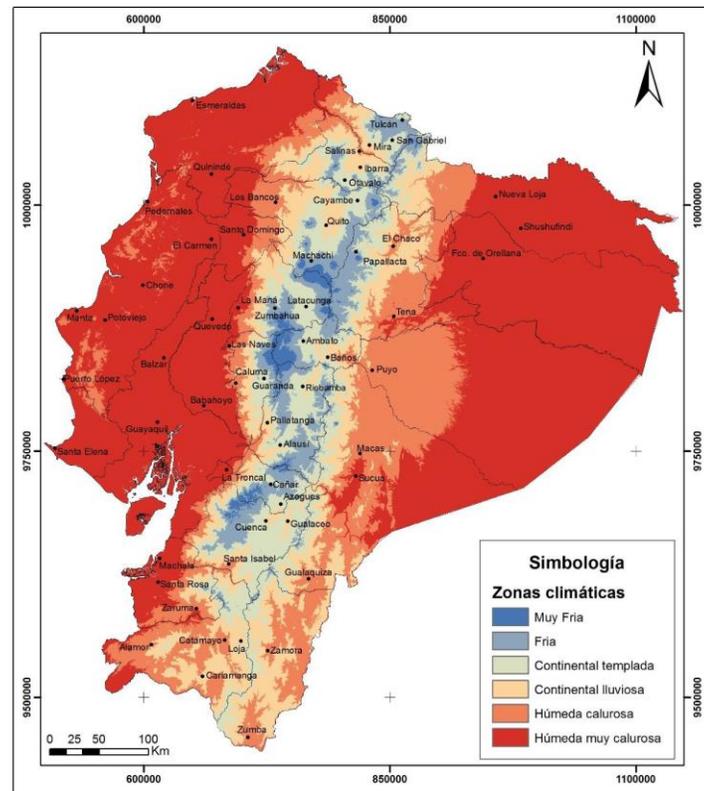


Figura 66. Mapa de zonas climáticas del Ecuador
Fuente: (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

Los tableros están proyectados a usarse en zonas de alto riesgo sísmico como se definió en el Capítulo I, que coinciden con las zonas húmedas muy calurosas. Cada zona climática exige requisitos mínimos principalmente en los materiales o componentes de la envolvente para mejorar el comportamiento térmico y energético de las edificaciones. (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

En la **Tabla 18** se muestran los requisitos que debe cumplir la envolvente para zonas Húmedas muy Calurosas (zona climática 1).

Tabla 18.
Requisitos de envolvente para zona climática 1

Elemento	Habitable		No habitable
	Climatizado	No Climatizado	
	Valor Min. R de aislamiento		
Paredes, sobre nivel del terreno	R-1.0	R-0.2	NA

Fuente: Modificado de (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

El resultado obtenido de R para el prototipo 2 lo posiciona como un material constructivo idóneo para la zona climática 1.

La zona climática 6 (muy fría) tiene el requerimiento más alto para el valor mínimo de R que el resto zonas climáticas y se muestra en la **Tabla 19**.

En la **Tabla 20** se muestra el porcentaje que es mayor la resistencia térmica R del prototipo 2 frente a los valores mínimos de R requeridos para mampostería en cada zona climática del Ecuador.

Tabla 19.
Requisitos de envolvente para zona climática 6

Elemento	Habitable		No habitable
	Climatizado	No Climatizado	
	Valor Min. R de aislamiento		
Paredes, sobre nivel del terreno	R-2.7	R-0.5	NA

Fuente: Modificado de (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

Tabla 20.
Aumento porcentual del valor R mínimo requerido

Zona Climática	Valor min R		Aumento porcentual	
	Climatizado	No climatizado	Climatizado	No climatizado
	[m ² K/W]		%	
1	1	0.2	289.75	1848.77
2	1.3	0.22	199.81	1671.61
3	1.7	0.36	129.27	982.65
4	2	0.4	94.88	874.38
5	2.3	0.4	69.46	874.38
6	2.7	0.5	44.35	679.51

4.3.3. Comparación

En la **Tabla 21** se muestran los valores de conductividad térmica λ para materiales convencionales usados en mampostería en la industria de la construcción en Ecuador frente al valor obtenido para el prototipo 2.

Tabla 21.*Coefficiente de conductividad para materiales típicos de mampostería*

Material	λ [W/m K]
Ladrillo	0.72
Bloque de concreto	0.62
Adobe	0.76
Hormigón	1.13
Panel de Gypsum	0.3
Prototipo 2	0.0316

Fuente: Modificada de (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018)

4.4. Ensayo de Absorción de energía sonora

4.4.2. Análisis

Mediante los datos obtenidos por el software ACUPRO observamos que el coeficiente de absorción de sonido en para cualquier frecuencia no supera el valor de 0,125 como se pueden observar en la **Figura 50** por lo cual se determina que es un material reflejante, esta condición sucede por la características de las caras de bambú que al ser una madera dura y compacta no presenta buenas propiedades de absorción de energía acústica, esto variaría si la onda incidente fuera absorbida por la balsa que es una madera poroso y de bajo peso presentando buenas propiedades de absorción.

4.4.3. Comparación

Tabla 22*SAC de materiales comunes de mampostería*

Material	FRECUENCIA EN HERTZ					
	125	250	500	1000	2000	4000

CONTINÚA

Bloque de concreto sin pintar	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Bloque de concreto pintado	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Concreto aparente sin pintar	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
PB2-S-1	0.067	0.069	0.075	0.08	0.071	0.066
PB2-S-2	0.096	0.125	0.105	0.095	0.068	0.069

Fuente: Modificado de (Secretaría de Educación Pública, 2014)

La **Tabla 22** nos permite la comparación de los resultados para las muestras con valores de mampostería comunes en lo cual podemos observar que frente al concreto aparente sin pintar y bloque de concreto pintado tiene valores similares para todas las frecuencias, lo cual no sucede con el bloque de concreto sin pintar donde su coeficiente de absorción casi lo triplica lo que implica una mayor absorción de energía acústica.

4.5. Ensayo de Comportamiento al Fuego

4.5.2. Análisis

La temperatura en los puntos 1 y 2 deberían tener igual valor debido a estar simétricamente separados del punto en donde se aplicó la llama, pero como lo muestra la **Tabla 14** y **Tabla 15** los valores difieren entre sí donde el punto 2 tiene valores elevados por causa de una inclinación a la derecha de la llama al momento de ser aplicada debido a la posición respecto al extractor de humo lo cual causaba esta desviación esto no pudo ser controlado porque las instalaciones no lo permitieron.

Al observar la **Figura 54** en el transcurso de tiempo de 0 a 60 min se observó que el incremento de temperatura es de 13 °C lo cual no sucede para el caso de la **Figura 55** en donde para el mismo

lapso de tiempo se evidencia un incremento de 30.7 °C, esta condición sucede por el actuar del material ignífugo el cual retrasa los efectos causados por la llama. Para el intervalo de tiempo de 60 a 80 min en la **Figura 54** se observó un incremento mayor de temperatura correspondiente a 17.6°C lo cual se atribuye a la pérdida de propiedades ignífugas del recubrimiento, desencadenando un incremento mayor de temperatura. Los valores de temperatura máximos alcanzados por los prototipos fueron de 61°C para PB2-FG-1 y 64.3 para PB2-FG-2 donde se evidencia que no existe una gran variación.

Se procedió a quitar la llama incidente como se muestra en la **Figura 56** y se apreció una llama propia de la combustión de las muestras la cual estuvo presente en ambas muestras, pero la cual no superó los 7 segundos y se extinguió por completo.

La **Figura 57** presenta las caras expuestas al fuego de las dos muestras en donde se puede observar una misma configuración de distribución de llama para ambas muestras con la variante que para la muestra PB2-FG-1 en la parte superior tiende a cerrarse por la acción del recubrimiento ignífugo lo cual no sucede con la otra muestra ya que como se puede observar tiende a abrirse en la parte superior.

El desprendimiento de material que perdió su integridad no se dio de la misma forma para las dos muestras, en el caso de la muestra PB2-FG-1 se produjo como pequeñas latillas de bambú hasta los 37 min de ensayo posterior a este tiempo el desprendimiento de latillas fue de mayor tamaño hasta la culminación del mismo, por el contrario, la muestra PB2-FG-2 siempre presentó desprendimiento de latillas de mayor tamaño durante los 120 min.

La penetración de la llama frente a las muestras fue distinta para las dos muestras para la PB2-FG-1 tuvo una penetración final de 109,5 mm y para la muestra PB2-FG-2 tuvo una penetración total como se puede observar y **Figura 58**.

Se realizó la medición de los valores máximos de largo y ancho de la sección consumida mostrada en la **Figura 59** en donde se observa que existe un mayor consumo de sección para el prototipo sin recubrimiento ignífugo.

El comportamiento mostrado por el recubrimiento ignífugo se pudo evidenciar como pequeñas burbujas las cuales rodeaban la zona de afectación evitando que la llama cubra un mayor porcentaje de sección.

Se pesaron las muestras antes y después de la elaboración del ensayo mostrado en la **Tabla 23** en donde existe una pérdida de 3 Kg para la muestra PB2-FG-1 y de 4 Kg para la muestra PB2-FG-2.

Tabla 23

Peso de las muestras antes y después de la elaboración del ensayo

Muestra	Peso antes de la elaboración del ensayo [Kg]	Peso después de la elaboración del ensayo [Kg]
PB2-FG-1	29	26
PB2-FG-2	30	26

4.5.3. Comparación

Tabla 24

Comportamiento presentado por las muestras

Variables	PB2-FG-1	PB2-FG-2	Mampostería de cemento	Mampostería de ladrillo
Pérdida de porcentaje en peso	11.53	13.33	Nula	Nula

CONTINÚA

Presencia de llama propia de la combustión de la muestra	Si	Si	No	No
Desprendimiento de material	Si	Si	No	No
Pérdida de sección	Menor	Mayor	No	No
Penetración de llama [mm]	109.5	124.3	No	No
Costo	Mayor	Intermedio	Menor	Menor

Al comparar las variables mostradas en la **Tabla 24** para las muestras PB2-FG-1 y PB2-FG-2 evidenciamos que no existe una variación significativa en sus propiedades y comportamientos, por lo cual se llega a la conclusión de que el uso del recubrimiento ignífugo no es indispensable si se desea darle un mejor comportamiento ante el fuego.

De manera similar en la **Figura 61** se puede evidenciar que la superficie afectada no varía de manera significativa entre el tablero con protección y sin protección. La **Tabla 16** nos muestra la profundidad de consumo del tablero ante el fuego, el tablero sin protección ignífuga muestra valores máximos de penetración 11% mayor que los valores máximos presentes en el tablero con protección ignífuga, a pesar de ello, el consumo volumétrico general no difiere en gran medida.

Frente a materiales a mamposterías tradicionales existe la mayor desventaja ya que estas no presentan ninguno de los parámetros exhibidos por las muestras, además su bajo costo la hace más atractiva en el mercado, esto realizando un análisis solo para el comportamiento al fuego ya que como se observó en los demás ensayos realizados las muestras tienen muchas otras cualidades que la hacen más convenientes al momento de elegir una adecuada mampostería en zonas de alto riesgo sísmico.

5. CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se caracterizó las propiedades de disipación de energía mediante el ensayo de flexión a fatiga para los de tableros estructurales, donde PB2-F-1 al 90% alcanzo una disipación de energía de 13215.43 [J] con 1453 ciclos, PB2-F-1 70% de 12399.71[J] con 41000 ciclos y PB2-F-1 al 55% de 2722.01 [J] con 10^5 ciclos.
- La absorción de energía fue encontrada mediante el ensayo de coeficiente de absorción de energía acústica, en donde su valor no excedió el 12.5% de absorción para ningún tipo de frecuencia, razón por la cual se determinó que es un material reflejante.
- Se encontró una conductividad térmica promedio para el prototipo 2 de 0.0317 [W/mK] por lo cual se lo catalogó como un material aislante térmico, también se obtuvo la resistencia térmica de 3.89 [m²K/W], valor que sobrepasa los requerimientos mínimos de la NEC-HS-EE (Eficiencia energética en edificaciones residenciales) por lo cual mejora el comportamiento térmico y energético al utilizar este tablero estructural como alternativa de mampostería, su aplicación está destinada para todas las zonas descritas en dicha normativa.
- El comportamiento exhibido frente al fuego de las muestras fue de buenas características ya que soportó un total de dos horas frente a llama directa sin la pérdida en gran porcentaje de su masa y presentó una baja inflamabilidad, además se verificó que no es necesario un recubrimiento ignífugo para una buena respuesta frente al fuego.

- Pese a presentar un buen comportamiento al fuego frente a la mampostería tradicional presenta su única desventaja ya que el tablero sufre pérdidas de sección, disminución en porcentajes de masa y penetración de la llama lo cual no ocurre con la mampostería tradicional.
- Existe variación de resultados de muestras similares en el ensayo de flexión estático y de fatiga, debido a que el método de construcción de los prototipos no es un método estandarizado.

5.2. Recomendaciones

- Realizar el ensayo de flexión a fatiga para una vida infinita del prototipo 2.
- Estandarizar el proceso de construcción de los tableros estructurales para garantizar la homogeneidad de las propiedades.
- Controlar a detalle las principales variables del proceso constructivo de los componentes del tablero caso contrario, ya sea que se implemente un método estandarizado de construcción del tablero estructural presentará bajas propiedades.
- Realizar un estudio de la vibración transversal con otros materiales bajo las mismas condiciones y compararlos con el estudio realizado para el prototipo 2 para encontrar las relaciones existentes entre la frecuencia y el módulo de elasticidad.
- Elaborar un proyecto de titulación que tenga como finalidad el medir las propiedades acústicas de los materiales como lo son el SAC y el coeficiente de aislamiento acústico.

6. REFERENCIAS

- Aguiar, R., Del Castillo, F., Mizobe, J., & Mendoza, P. (28 de 05 de 2016). Rehabilitation of building affected by the Ecuador earthquake of 16 april 2016 in the ULEAM. *Revista Gaceta Técnica*, 9-22.
- Andino, N. (Marzo de 2019). Tableros estructurales compuestos tipo sándwich constituidos por un núcleo de balsa y paneles externos de bambú como alternativa de mampostería no convencional para construcciones ecológicas en regiones de alto riesgo sísmico del ecuador. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Ashish, S., & Poonam, T. (2017). Modal Analysis of Single Rectangular Cantilever Plate by Mathematically, FEA and Experimental. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 264-269.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2011). Guía de patologías constructivas, estructurales y no estructurales. Bogotá, Colombia: Grupo Magenta.
- ASTM C177-19. (2019). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM C393 / C393M-16. (2016). *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Barron, R. (2003). *Industrial Noise Control and Acoustics*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Besednjak, A. (2005). *Materiales Compuestos*. Barcelona: UPC.
- Bezazi, B., El Mahi, A., Berthelot, J., & Bezazi, A. (2009). Experimental Analysis Of Behavior And Damage Of Sandwich Composite Materials In Three-Point Bending Part 2. Fatigue Test Results And Damage Mechanisms. *Strength of Materials*, 257-267.
- Blauert, J., & Xiang, N. (2009). *Acoustics for Engineers*. Bochum: Springer.
- Borrega, M., & Gibson, L. (2015). Mechanics of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Mechanics of Materials*, 75 - 90.
- Borrega, M., Ahvenainen, P., Serimaa, R., & Gibson, L. (2015). Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood. *Wood Science and Technology*, 403 - 420.
- Callister, W. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. New York: Reverté.
- Chen, K., Neugebauer, T., Goutierre, A., Tang, L., Glicksman, L., & Gibson, L. (2014). Mechanical and thermal performance of aerogel-filled sandwichpanels for building insulation. *Energy and Buildings*, 336–346.
- Código Técnico de la Edificación. (2006). *Documento Básico SI: Seguridad Caso de Incendio*. Código Técnico de la Edificación.
- Da Silva, E. G. (2011). Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera Langsdorffii* Desf Using Resonance Analysis. 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47.
- Ermann, M. (2015). *Architectural Acoustics Illustrated*. New Jersey: Wiley.
- Fletcher, M. I. (1951). Balsa - Production and Utilization. *Economic Botany*, 107 - 125.
- García, M. R. (2002). *Resistencia de Materiales*. Universitat Jaume I.
- García, M., & Barrigas, H. (Enero de 2019). Tableros estructurales tipo sándwich compuestos de melina (gmelina arborea). Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Harris, C., & Piersol, A. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook*. New York: McGraw-Hill.

- Harte, M., Fleck, N., & Ashby, M. (2001). The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core. *International Journal of Fatigue*, 499-507.
- Increopera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de calor*. Pearson.
- Kreith, F., Raj, M., & Mark, B. (2011). *Principles of heat transfer*. Stamford: Cengage Learning.
- Lakes, R. (2009). *Viscoelastic Materials*. New York: Cambridge.
- Lee, Y. P. (2005). *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*. Oxford: Elsevier.
- Leite, E., Gherardi, P., Souza, T., & Rabelo, G. (2012). Estimation of the dynamic elastic properties of wood from *Copaifera langsdorffii* Desf using resonance analysis. *CERNE*, 41-47.
- Liese, W., & Köhl, M. (2015). *Bamboo: The Plant and its Uses*. New York: Springer.
- Malavia, J. (2012). *Caracterización de Paneles Sándwich Híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales.
- Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones. (28 de Marzo de 2019). *Ministerio de Comercio Exterior e Inversiones*. Obtenido de <https://www.comercioexterior.gob.ec/ecuador-es-el-primer-exportador-de-balsa-y-segundo-exportador-de-camaron-en-el-mundo/?fbclid=IwAR1UEgC-1xOopq-eJdYoXwVN-d7vZRmQtSwMtlI2WpAQx6W6q4PTIwvsvmg>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2018). *Norma Ecuatoria de Construcción. Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Monti, A., El Mahi, A., Jendill, Z., & Guillaumat, L. (2018). Quasi-static and fatigue properties of a balsa cores sandwich structure with thermoplastic skins reinforced by flax fibre. *Journal of Sandwich Structures and Materials*.
- Moreno, R. (2005). *Reología de suspensiones Cerámicas*. Madrid: Bouncopy S.A.
- Muñoz, L. (2016). *Sieerie-Cloud: Servicio de Inspección y Evaluación Espacial del Riesgo de Incendios Estructurales en La Nube*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (Diciembre de 2014). Peligro sísmico. Diseño sismo resistente. Ecuador: Dirección de comunicación social, MIDUVI.
- Núñez, C., Roca, A., & Jorba, J. (2013). *Comportamiento Mecánico de los Materiales Volumen 2. Ensayos mecánicos Ensayos no destructivos*. Barcelona: Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- Núñez, G., & Manobanda, C. (2017). *Estudio del comportamiento del acero de refuerzo expuesto al fuego durante diferentes periodos de tiempo*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil.
- Parra, P. (2016). La balsa, la apuesta del sector maderero. *Gestión*, 42-44.
- Rao, S. (2007). *Vibration of Continuous Systems*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Ross, R. J., Geske, E. A., Larson, G. R., & Murphy, J. F. (1991). *Transverse vibration nondestructive testing using a personal computer*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Services, Forest Products Laboratory.
- Sargianis, J., Kim, H.-I., Andrés, E., & Suhr, J. (17 de Septiembre de 2012). Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites. Delaware: Elsevier. ScienceDirect®. (8 de 11 de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-conductivity-coefficient>

- Secretaría de Educación Pública. (2014). *Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*.
- Señas, L., Maiza, P., Priano, C., Marfil, S., & Valea, J. (2010). *Evaluación de elementos estructurales de hormigón expuestos a un incendio*. Córdoba: Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras.
- Sharma, N., Gibson, R., & Ayorinde, E. (2006). Fatigue of Foam and Honeycomb Core Composite Sandwich Structures: A Tutorial. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 263-319.
- Sotomayor, J. V. (2006). *Comportamiento viscoelástico de la madera*.
- Sundén, B., & Fu, J. (2017). *Heat transfer in aerospace applications*. United Kingdom: Elsevier.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. New York: Cambridge University Press.
- Turk, C., Hunt, J., & Marr, D. (2008). *Cantilever-Beam Dynamic Modulus for Wood Composite Products*. Washington, D.C.: USDA.
- Ugena, C. N., & Pozuelo, E. B. (20 de 06 de 2017). *Elasticidad y Resistencia de Materiales II*. Obtenido de <http://ocw.uc3m.es/historico/elasticidad-y-resistencia-ii>.
- Urbán, P. (2013). *Construcción de estructuras de madera*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Ureña, M., & Alvarado, G. (2016). *Estudio del comportamiento del concreto estructural expuesto al fuego*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil.
- Velasco Roldán, L., Goyos Pérez, L., Delgado García, R., & Freire Amores, L. (2016). Device for measuring thermal conductivity of composites based on biomass waste. *Enfoqueute*, 69-81.
- Vinson, J. (1999). *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. Lancaster: Technomic.
- Vinson, J. (2005). *Sandwich Structures: Past, Present and Future*.
- Vitale, J., Francucci, G., & Stocchi, A. (2016). Thermal conductivity of sandwich panels made with synthetic and vegetable fiber vacuuminfused honeycomb cores. *Sandwich Structures and Materials*, 66–82.
- Zhang, J., Shen, Y., Jiang, B., & Li, Y. (2018). Sound absorption characterization of natural materials and sandwich structure composites. *Aerospace*, 5-75.

Anexos