



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH COMPUESTOS DE
MELINA (*GMELINA ARBOREA*)
Y BALSA (*OCHROMA PYRAMIDALE*) PARA SER UTILIZADOS COMO
PARED ALTERNATIVA EN CONSTRUCCIONES NO-
CONVENCIONALES UBICADAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO
SÍSMICO DEL ECUADOR**

**AUTORES:
BARRIGAS ZHANG, HUA LUN
GARCÍA PEÑALOZA, MARCOS ANDRÉS**

**DIRECTOR:
TCRN. GONZÁLEZ MOSQUERA, OSWALDO MAURICIO Ph.D**

**SANGOLQUÍ
2019**



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH COMPUESTOS DE MELINA (GMELINA ARBOREA) Y Balsa (OCHROMA PYRAMIDALE) PARA SER UTILIZADOS COMO PARED ALTERNATIVA EN CONSTRUCCIONES NO-CONVENCIONALES UBICADAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR**" fue realizado por el señor **Barrigas Zhang, Hua Lun y García Peñaloza, Marcos Andrés** 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, 18 de enero de 2019

Firma:


Tcn. González Mosquera Oswaldo Mauricio, Ph.D
C. C 1708586274



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Barrigas Zhang, Hua Lun y García Peñaloza, Marcos Andrés*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH COMPUESTOS DE MELINA (GMELINA ARBOREA) Y Balsa (Ochroma pyramidale) para ser utilizados como pared alternativa en construcciones no-convencionales ubicadas en regiones de alto riesgo sísmico del Ecuador*** 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, 18 de enero de 2019

Firma:

Sr. Barrigas Zhang Hua Lun
C. C 1723203574

Firma:

Sr. García Peñaloza Marcos Andrés
C. C 1722813340



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Barrigas Zhang, Hua Lun y García Peñaloza, Marcos Andrés**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH COMPUESTOS DE MELINA (GMELINA ARBOREA) Y Balsa (OCHROMA PYRAMIDALE) PARA SER UTILIZADOS COMO PARED ALTERNATIVA EN CONSTRUCCIONES NO-CONVENCIONALES UBICADAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 18 de enero de 2019

Firma:

Sr. Barrigas Zhang Hua Lun
C. C 1723203574

Firma:

Sr. García Peñaloza Marcos Andrés
C. C 1722813340

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios por ser la inspiración y darme fuerzas para cumplir una de las primeras metas de mi vida profesional.

A mi familia por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad y por motivarme constantemente para alcanzar mis anhelos.

A todas las personas que me han apoyado, compartiendo su conocimiento y colaborando para que este proyecto se realice con éxito.

Hua Lun Barrigas Zhang.

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo, sacrificio y dedicación que representa este trabajo, es fruto del amor, apoyo y enseñanza que me ha dado mi familia, esto se los dedico a ustedes.

A mi padre Héctor, por ser mi primer maestro, por brindarme toda la ayuda que siempre necesite, por hacer de mi un hombre respetuoso y siempre atento con las personas.

A mi madre Mercedes, por serlo todo en mi vida, por ese ejemplo de lucha y sacrificio por sus sueños, por su incansable fuerza para combatir las adversidades, por esa sonrisa que brinda cuando uno busca refugio y el amor incondicional que da a toda su familia.

A mi hermano Carlos, porque sin él no sería nadie, por ser mi primer y mejor amigo, la persona en la que más confié, por su guía, sus consejos y todos los sacrificios que hace para que seamos felices.

A mi hermana Giselle, por hacer que mi vida sea alegre, por su comprensión y cariño cuando las cosas se ponen difíciles, por su apoyo en todos mis proyectos. Por ser el motivo para mejorar cada día y siempre luchar por algo mejor.

A mi novia Sofía, por todo el amor que me brinda, por ser el refugio donde siempre puedo llegar, por ser mi compañera de aventuras, por todos sus consejos y compartir conmigo su visión de la vida.

A todos mis amigos dentro y fuera de la universidad porque sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

Marcos Andrés García Peñaloza.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme y guiarme a lo largo de mi vida y por ser el apoyo en los momentos de debilidad y dificultad.

A mi familia por su sacrificio, trabajo y amor que me han brindado en el transcurso de mi vida, por confiar, promover mis sueños y por siempre anhelar lo mejor para mi vida.

Al Tcn. Oswaldo Mauricio González, Ph. D. por su dedicación, paciencia y apoyo incondicional, brindándonos su conocimiento adquirido con su experiencia y orientarnos de la mejor manera durante la ejecución de este proyecto.

A los Ingenieros encargados de los laboratorios que nos guiaron y brindaron todas las facilidades para ejecución de los ensayos.

De igual manera la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por brindarme todos los conocimientos de mi preparación profesional, por ser mí segundo hogar.

Agradezco a la empresa 3A Composites, por su apertura ante temas de investigación, colaborándonos con el material y personal necesario para realizar este proyecto.

Finalmente agradezco a mi amigo y compañero Andrés García, como también a mis amigos, por compartir sus experiencias, trabajo y apoyarme en los momentos de necesidad, por los buenos momentos y por su amistad brindada cada día.

Hua Lun Barrigas Zhang.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme bendecido con la vida, por haberme guiado y situado en los lugares que necesitaba, por cuidar a las personas que más amo y nunca dejarme solo en mis momentos más difíciles.

A mi familia, por todo el apoyo y cariño que me han dado, por su amor incondicional y comprensión en los momentos más difíciles de mi vida, por fomentar mis sueños, darme su ayuda y desearme siempre lo mejor.

A ti Sofia Pineda, por enseñarme que el amor verdadero existe, por estar junto a mí en cada aspecto de mi vida, por ser mi novia, mi mejor amiga, por ayudarme cuando me he sentido derrotado y motivarme para alcanzar mis metas.

Al Tcrn. Oswaldo Mauricio González, Ph. D. por su orientación durante la realización de este proyecto, su conocimiento, dedicación, paciencia y apoyo incondicional, fueron esenciales para poder llevar a cabo la investigación.

Al Ing. Francisco Navas por brindarnos su conocimiento y apoyo al momento de realizar ensayos de laboratorio. A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por regalarme los mejores años de mi vida y haberme permitido conocer gente excepcional y prepararme para mi vida profesional.

Al Ing. Marcelino Guachambala y la empresa 3A Composites, por darnos la oportunidad de desarrollar el presente proyecto, por su apoyo y colaboración, muchas gracias.

A mi buen amigo Hua Lun Barrigas, por toda la dedicación, trabajo y compromiso invertidos en esta investigación, por ser un excelente compañero en los momentos tanto difíciles como satisfactorios de la misma. Buena suerte en todo hermano.

Finalmente agradezco a todos mis amigos y docentes, por todas las experiencias vividas a lo largo de esta bella etapa, no me queda más que agradecer por su amistad y apoyo incondicional, cada uno marco mi vida para siempre.

Marcos Andrés García Peñaloza

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xxi
RESUMEN	xxix
ABSTRACT.....	xxx
 CAPÍTULO I	
 GENERALIDADES	
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Planteamiento del problema	5
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivo General.....	10

1.4.2. Objetivo Específicos	10
1.5. Justificación e Importancia.....	11
1.6. Alcance	12

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes Investigativos	13
2.2. Fundamentación teórica.....	16
2.2.1. Eficiencia mecánica	16
2.2.2. Engineering Wood Products (EWPs).....	18
2.2.3. Estructura tipo sándwich.....	25
2.2.4. Hardwoods y softwoods.....	30
2.2.4.1. Melina (Gmelina arborea)	31
2.2.4.2. Balsa (Ochroma pyramidale)	33
2.2.5. Ligantes	36
2.3. Hipótesis	37
2.4. Variables	37
2.4.1. Variables independientes	37
2.4.2. Variable dependiente.....	37
2.5. Normativa relacionada	38

CAPÍTULO III

ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS

3.1. Estudio de factibilidad de materiales para la elaboración de tableros estructurales tipo sándwich.....	41
3.1.1. Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>).....	41
3.1.1.1. Disponibilidad de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) en Ecuador.....	41
3.1.1.2. Propiedades físicas y mecánicas de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>).....	44
3.1.2. Melina (<i>Gmelina arborea</i>).....	49
3.1.2.1. Disponibilidad de melina (<i>Gmelina arborea</i>) en Ecuador.....	49
3.1.2.2. Propiedades físicas y mecánicas de melina (<i>Gmelina arborea</i>) Ecuador.....	50
3.2. Estudio de factibilidad de ligantes a usar.....	53
3.2.1. Urea formaldehído (UF).....	55
3.2.2. Poliuretano.....	56
3.3. Adquisición de materiales.....	57
3.4. Elaboración de paneles externos (CLT) de madera de melina.....	58
3.5. Elaboración de núcleo de madera de balsa.....	64
3.6. Unión de pieles y núcleo con ligante.....	66

CAPÍTULO IV

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE PROTOTIPOS DE TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH

4.1. Introducción	70
4.2. Materiales y métodos	72
4.2.1. Densidad y contenido de humedad	72
4.2.1.1. Prototipo de tablero estructural tipo sándwich	72
4.2.1.2. Análisis de materiales de prototipos de tablero estructural tipo sándwich...	77
4.2.2. Ensayo de compresión	80
4.2.2.1. Selección de material	81
4.2.2.2. Preparación de material.....	83
4.2.2.3. Protocolo del ensayo	84
4.2.2.4. Esfuerzo último a compresión.....	85
4.2.2.5. Módulo de elasticidad	86
4.2.3. Ensayo de tracción	88
4.2.3.1. Selección de material	89
4.2.3.2. Preparación de material.....	89
4.2.3.3. Configuración de ensayo	91
4.2.3.4. Esfuerzo último a tracción plana.....	93

4.2.4. Ensayo de flexión	93
4.2.4.1. Selección de material	94
4.2.4.2. Preparación de material.....	95
4.2.4.3. Configuración de ensayo	96
4.2.4.4. Esfuerzo último a corte del núcleo.....	99
4.2.4.5. Esfuerzo de flexión de los paneles externos	99
4.2.5. Ensayo de corte.....	100
4.2.5.1. Selección de material	100
4.2.5.2. Preparación de material.....	101
4.2.5.3. Configuración de ensayo	103
4.2.5.4. Esfuerzo a corte del núcleo	105
4.2.5.5. Módulo de corte del núcleo.....	106
4.3. Resultados	107
4.3.1. Resultados de pruebas de densidad seca y contenido de humedad.....	107
4.3.1.1. Densidad seca y contenido de humedad de prototipo de tablero estructural sándwich.....	107
4.3.1.2. Densidad y contenido de humedad de elementos constituyentes del prototipo de tablero estructural tipo sándwich	108
4.3.2. Resultados pruebas de compresión	111

4.3.2.1. Módulo de elasticidad y esfuerzo último a compresión.....	111
4.3.3. Resultados de pruebas de tracción	117
4.3.3.1. Esfuerzo último a tracción	117
4.3.4. Resultados de pruebas de flexión.....	119
4.3.4.1. Esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de paneles externos	119
4.3.5. Resultados de pruebas de corte	126
4.3.5.1. Esfuerzo a corte del núcleo y Módulo de corte del núcleo (G)	126
4.4. Discusión de resultados	132

CAPÍTULO V

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL

5.1. Introducción	138
5.2. Materiales y métodos.....	139
5.2.1. Modelamiento de elementos finitos	139
5.2.1.1. Detalles del modelo	139
5.2.1.2. Condiciones de carga	146
5.2.1.3. Método seleccionado para medición de la progresión de esfuerzos.	149
5.2.1.4. Modelo óptimo de convergencia	150
5.2.2. Análisis de elementos finitos.....	165
5.2.2.1. Biomecánica del tablero estructural tipo sándwich	165

5.2.3. Eficiencia mecánica de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich.....	166
5.2.3.1. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y rigidez del material.....	167
5.2.3.2. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y resistencia del material.....	170
5.3. Resultados.....	172
5.3.1. Biomecánica del tablero bajo esfuerzos de compresión.....	172
5.3.1.1. Factores de compensación.....	173
5.3.2. Biomecánica del tablero bajo esfuerzos de flexión.....	176
5.3.2.1. Factores de compensación.....	178
5.3.3. Eficiencia mecánica.....	180
5.3.3.1. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y rigidez del material.....	181
5.3.3.2. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y resistencia del material.....	184

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TABLEROS PROPUESTOS Y COMPARACIÓN CON ELEMENTOS CONVENCIONALES

6.1. Cálculo de cargas admisibles en dirección axial.....	187
---	-----

6.2. Cálculo de cargas admisibles en dirección lateral	193
6.3. Propuesta de tableros de diferentes espesores	199
6.4. Memoria de cálculo	200
6.4.1. Carga admisible en dirección axial	200
6.4.2. Carga admisible lateral	201
6.4.3. Resumen de características de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de diferentes espesores.....	203
6.5. Costos referenciales	209
6.6. Comparación con materiales convencionales	210
6.6.1. Comparación con materiales convencionales por su costo	210
6.6.2. Comparación con materiales convencionales por su densidad	212
6.6.3. Comparación con materiales convencionales por su resistencia.....	216
6.6.4. Comparación con materiales convencionales por su costo energético de producción	218

CAPÍTULO VII

ESTUDIOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Estudios Futuros	222
7.1.1. Resistencia al fuego	222
7.1.2. Aislamiento acústico	224

7.1.3. Protección ante agentes patógenos	226
7.1.4. Capacidad de absorción y disipación de energía de los tableros estructurales tipo sándwich.....	229
7.2. Conclusiones	230
7.3. Recomendaciones	233
7.4. Bibliografía	235

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Pieles y núcleos de paneles tipo sándwich</i>	26
Tabla 2 <i>Propiedades físico-mecánicas de BALTEK®. Tomado de PLANTABAL® (2016)</i>	35
Tabla 3 <i>Propiedades físicas y mecánicas balsa (Ochroma pyramidale)</i>	48
Tabla 4 <i>Propiedades físicas y mecánicas de melina (Gmelina arborea)</i>	53
Tabla 5 <i>Muestras seleccionadas para el ensayo de densidad.</i>	74
Tabla 6 <i>Muestras de elementos separados seleccionados para el ensayo de densidad</i>	79
Tabla 7 <i>Muestras seleccionadas para ser ensayadas a compresión</i>	82
Tabla 8 <i>Muestras destinadas a ser ensayadas bajo el modo mecánico de tracción....</i>	89
Tabla 9 <i>Muestras destinadas a ser ensayadas bajo el modo mecánico de flexión</i>	95
Tabla 10 <i>Muestras destinadas para el ensayo de corte</i>	101
Tabla 11 <i>Valores de densidad y contenido de humedad de muestras de prototipo 1.</i>	107
Tabla 12 <i>Valores de densidad y contenido de humedad de muestras de prototipo 2</i>	107
Tabla 13 <i>Resultados de densidad y contenido de humedad para panel externo de melina (e=17 mm). Prototipo 1</i>	108
Tabla 14 <i>Resultados de densidad y contenido de humedad para panel externo de melina (e=34 mm). Prototipo 2</i>	109
Tabla 15 <i>Resultados de densidad y contenido de humedad para panel de núcleo de balsa (e=43 mm). Prototipo 1</i>	109

Tabla 16 <i>Resultados de densidad y contenido de humedad para panel de núcleo de balsa (e=88 mm). Prototipo 2</i>	110
Tabla 17 <i>Resultados prueba de compresión en dirección tangencial (T). Prototipo 1</i>	111
Tabla 18 <i>Resultados prueba de compresión en dirección tangencial (T). Prototipo 2</i>	112
Tabla 19 <i>Resultados prueba de tracción. Prototipo 1</i>	117
Tabla 20 <i>Resultados prueba de tracción. Prototipo 2</i>	117
Tabla 21 <i>Valores de esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión paneles exteriores. Prototipo 1</i>	120
Tabla 22 <i>Valores de esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión paneles exteriores. Prototipo 2</i>	120
Tabla 23 <i>Valores de Esfuerzo último a corte y Módulo de corte del núcleo. Prototipo 1</i>	126
Tabla 24 <i>Valores de Esfuerzo último a corte y Módulo de corte del núcleo. Prototipo 2</i>	126
Tabla 25 <i>Dimensiones de modelos de elementos finitos</i>	142
Tabla 26 <i>Carga aplicada en cada caso de modelación</i>	148
Tabla 27 <i>Resultados del estudio de convergencia del modo mecánico de compresión. Prototipo 1</i>	152
Tabla 28 <i>Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de compresión. Prototipo 2</i>	155
Tabla 29 <i>Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de flexión. Prototipo 1</i>	159

Tabla 30	<i>Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de flexión.</i>	
	<i>Prototipo 2</i>	162
Tabla 31	<i>Datos óptimos de FEA para prototipos ensayados bajo modo mecánico de compresión</i>	173
Tabla 32	<i>Factor de compensación para el esfuerzo máximo a compresión de prototipos</i>	175
Tabla 33	<i>Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de compresión.</i>	
	<i>Prototipo 1</i>	175
Tabla 34	<i>Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de compresión.</i>	
	<i>Prototipo 2</i>	176
Tabla 35	<i>Datos óptimos de FEA para prototipos ensayados bajo el modo mecánico de flexión</i>	178
Tabla 36	<i>Factor de compensación para el esfuerzo máximo a flexión de prototipos.</i>	179
Tabla 37	<i>Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de flexión.</i>	
	<i>Prototipo 1</i>	179
Tabla 38	<i>Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de flexión.</i>	
	<i>Prototipo 2</i>	180
Tabla 39	<i>Datos para el cálculo de eficiencia mecánica de los prototipos</i>	180
Tabla 40	<i>Índice de rendimiento (PI_1)</i>	181
Tabla 41	<i>Índice de rendimiento (PI_2)</i>	184
Tabla 42	<i>Longitud efectiva</i>	189
Tabla 43	<i>Datos para el cálculo de carga axial admisible</i>	200
Tabla 44	<i>Datos para el cálculo de carga lateral admisible</i>	202

Tabla 45 <i>Prototipos de tableros estructurales tipo sándwich</i>	
<i>(Núcleo de balsa = 4 cm)</i>	203
Tabla 46 <i>Prototipos de tableros estructurales tipo sándwich</i>	
<i>(Núcleo de balsa =8.9 cm)</i>	204
Tabla 47 <i>Costo por metro cuadrado de tablero estructural tipo sándwich.</i>	
<i>Prototipo 1</i>	209
Tabla 48 <i>Costo por metro cuadrado de tablero estructural tipo sándwich.</i>	
<i>Prototipo 2</i>	209
Tabla 49 <i>Costo por metro cuadrado de materiales tradicionales</i>	211
Tabla 50 <i>Densidad de paredes de bloque</i>	215
Tabla 51 <i>Comparación de pesos por metro cuadrado</i>	215
Tabla 52 <i>Resistencia mínima del bloque a compresión simple</i>	216
Tabla 53 <i>Datos de resistencia de distintos tipos de ladrillos</i>	216
Tabla 54 <i>Resistencia a la compresión de elementos utilizados para la elaboración</i> <i>de muros</i>	217
Tabla 55 <i>Costo energético de producir distintos materiales de ingeniería</i>	219
Tabla 56 <i>Daños de la madera por aplicación de diversos tipos de energía</i>	228

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Pared de mampostería caída después del terremoto de abril del 2016.....	6
Figura 2 Pared de mampostería caída sobre autos Avenida Juan Carlos I de Lorca, después del terremoto del 2011	6
Figura 3 Hotel Fogón Manabita, en el malecón de Tonsupa, presenta fisuras, grietas y colapso de paredes de mampostería.....	9
Figura 4 (a) Flexibilidad (MOE) vs densidad seca de materiales de ingeniería (b) Flexibilidad (MOE) vs densidad seca para maderas y sus constituyentes.....	17
Figura 5 Muestra de CLT elaborado a base de ... Gmelina arbórea y tomado de uno de los prototipos usados en esta investigación.....	21
Figura 6 Laminated Veneer Lumber	22
Figura 7 Poste de transmisión eléctrica elaborado en base a coconut veneers based composites.....	23
Figura 8 Glulam	24
Figura 9 Oriented Strand Board.....	24
Figura 10 Esquema de una estructura tipo sándwich elaborado en base a paneles externos de melina (Gmelina arbórea) y un núcleo de balsa (Ochroma pyramidale).....	27
Figura 11 Muestra de núcleo rígido elaborado a base de balsa (Ochroma pyramidale)	29
Figura 12 Conformación de un CLT.....	30
Figura 13 Árbol de melina (Gmelina arborea).....	32

Figura 14 Árbol de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	34
Figura 15 Distribución natural de balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) en América	42
Figura 16 Lugares originarios de melina (<i>Gmelina arborea</i>).....	49
Figura 17 Trozas de melina apiladas para su humectación.....	58
Figura 18 Transporte de trozas de melina.	59
Figura 19 Torno con troza de melina	60
Figura 20 Producto final del tornado (chapas de melina)	60
Figura 21 Chapas de melina al 12% de humedad	61
Figura 22 Configuración de equipo de secado	61
Figura 23 Distribución de chapas de melina para conformar un CLT	62
Figura 24 Extracción de CLT de melina y apilado	63
Figura 25 Encuadre de CLT de melina	63
Figura 26 Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) en (a) estado natural, (b) trozas listas para su transporte.....	64
Figura 27 (a) Proceso de corte de paneles externos de melina, (b) encuadre de paneles de núcleo de balsa con paneles externos de melina.....	66
Figura 28 Colocación de poliuretano en panel externo inferior de melina	67
Figura 29 Proceso de ensamblaje del prototipo de tablero estructural tipo sándwich (a) panel de núcleo de balsa sobre panel exterior de melina (b) poliuretano colocado sobre panel de núcleo de balsa	67
Figura 30 Superposición de panel exterior superior de melina	68
Figura 31 Transporte de prototipos de tableros tipo sándwich a la prensa monoplato .	68

Figura 32 Prensado de tablero estructural tipo sándwich (a) tablero antes de aplicar presión, (b) tablero después de aplicar presión.	69
Figura 33 Etapa final del proceso de elaboración del prototipo de tablero estructural tipo sándwich	69
Figura 34 Geometría estándar y sus respectivos sentidos de estudio (a) Prototipo 1, (b) Prototipo 2.	72
Figura 35 Muestras para ensayo de densidad de (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.....	73
Figura 36 Muestras de elementos de prototipo de tablero estructural tipo sándwich para ensayo de densidad, (a) paneles externos de melina del prototipo de tablero 1, (b) paneles externos del prototipo de tablero 2, (c) panel de núcleo de balsa del prototipo de tablero 1, (d) panel de núcleo de balsa del prototipo de tablero 2.....	77
Figura 37 Muestras para ensayo mecánico compresión (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	81
Figura 38 Dimensiones nominales de muestras para ensayo mecánico de compresión, (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2	82
Figura 39 Detalles de la configuración del ensayo a compresión (Galgas extensométricas)	85
Figura 40 Ejemplo práctico de cálculo de Módulo de elasticidad (Gráfica Stress vs Strain)	87
Figura 41 Muestras para ensayo de tracción (a) prototipo de tablero estructural 1 y (b) prototipo de tablero estructural 2	88

Figura 42 Dimensiones nominales de muestras destinadas a ser ensayadas a tracción (a) prototipo de tablero estructural 1 y (b) prototipo de tablero estructural 2.....	90
Figura 43 Configuración de ensayo de tracción.....	92
Figura 44 Muestras para ensayo de flexión, (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	94
Figura 45 Dimensiones nominales de muestras destinadas al ensayo de flexión (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.....	96
Figura 46 Distribución y aplicación de carga para prueba de flexión en cuatro puntos.....	97
Figura 47 Configuración de ensayo mecánico de flexión	98
Figura 48 Muestras para ensayo de corte (a) prototipo 1, (b) prototipo 2.....	100
Figura 49 Dimensiones nominales de muestras destinadas al ensayo de corte (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.....	102
Figura 50 Distribución de carga en sentidos del prototipo de tablero estructural tipo sándwich y línea de acción de carga en la configuración del ensayo de corte.....	104
Figura 51 Esfuerzo último a compresión vs Deformación unitaria (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	113
Figura 52 Esfuerzo último promedio a compresión vs Densidad (M.C. 12%) (kg/m ³), (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2.....	114
Figura 53 Módulo de elasticidad en dirección tangencial (T) vs densidad (M.C. 12%) (kg/m ³), (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2	115

Figura 54 Gráfico Fuerza (kg) vs Desplazamiento (mm). (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	119
Figura 55 Fuerza aplicada vs desplazamiento, (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	122
Figura 56 Esfuerzo último a corte vs Densidad (M.C.12 %), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2	123
Figura 57 Esfuerzo de flexión de caras vs Densidad (M.C.12 %), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2.....	125
Figura 58 Esfuerzo a corte del núcleo vs Deformación, (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2	128
Figura 59 Esfuerzo a corte del núcleo vs Densidad (M.C. 12%), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2.....	130
Figura 60 Módulo de corte (G) vs Densidad seca (M.C. 12%), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2.....	131
Figura 61 Modelo de prototipo de tablero estructural tipo sándwich elaborado bajo modelación de elementos finitos, para el análisis bajo el modo mecánico de compresión uniaxial. a) Vista Lateral, b) Vista Isométrica ...	141
Figura 62 Modelo de prototipo de tablero estructural tipo sándwich elaborado bajo modelación de elementos finitos, para el análisis bajo el modo mecánico de flexión en 4 puntos. a) Vista Lateral, b) Vista Isométrica	141
Figura 63 (a)Tipos de elementos finitos, (b) 3D Brick element 8 nodes	145
Figura 64 Casos de aplicación de carga en el modelo de elementos finitos del modo mecánico de compresión	147

- Figura 65** Casos de aplicación de carga en el modelo de elementos finitos del modo mecánico de flexión.....148
- Figura 66** Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección axial, b) desplazamiento resultante en dirección tangencial (T). Prototipo 1 compresión 153
- Figura 67** Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección axial, b) desplazamiento resultante en dirección tangencial (T). Prototipo 2 compresión 156
- Figura 68** Ejemplo de la modelación del prototipo de tablero estructural tipo sándwich en elementos finitos, (a) modelo previo a la aplicación de carga,(b) modelo una vez aplicada y mantenida la carga a compresión ... 157
- Figura 69** Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L), b) desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L). Prototipo 1 flexión..... 160
- Figura 70** Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L), b) desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L). Prototipo 2 flexión..... 163

- Figura 71** Ejemplo de la modelación del prototipo de tablero estructural tipo sándwich en elementos finitos, (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) modelo una vez aplicada y mantenida la carga a flexión 164
- Figura 72** Propiedades de materiales naturales, representa el Módulo de Young contra la densidad. Directrices identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos.....169
- Figura 73** Propiedades de materiales naturales, representa la fuerza frente a la densidad. Directrices identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y fuertes..... 171
- Figura 74** (a)Tipo de falla en el prototipo de tablero estructural tipo sándwich, (b) evolución de falla en sentido radial..... 172
- Figura 75** (a) Falla presentada al momento de ensayar el modo mecánico de compresión, (b) falla admisible según norma ASTM C364 173
- Figura 76** Falla de prototipo 1, para el modo mecánico de flexión..... 177
- Figura 77** Falla de prototipo 2, para el modo mecánico de flexión..... 177
- Figura 78** Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en la gráfica que relaciona módulo de elasticidad contra densidad 182
- Figura 79** Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en la gráfica que relaciona fuerza contra densidad de distintos materiales de ingeniería 185
- Figura 80** Muestra ensayada en laboratorio (1), prototipo de tablero estructural tipo sándwich dimensiones estándar (2). 191

Figura 81 Modelo del tablero estructural tipo sándwich elaborado en el programa SAP 2000.....	194
Figura 82 Modelación de fuerza lateral puntual aplicada al tablero estructural tipo sándwich elaborado en el programa SAP 2000.....	195
Figura 83 Resultados modelación de elementos finitos en SAP 2000, (a) Deformación del modelo una vez aplicada la carga, (b) cuadro de resultados por nudo elaborado por el programa SAP 2000.....	196
Figura 84 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con panel de núcleo de balsa de 4 cm de espesor, (a) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI1), (b) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI1), (c) carga axial admisible vs vs índice de rendimiento (PI2), (d) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI2)	206
Figura 85 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con panel de núcleo de balsa de 8.9 cm de espesor, (a) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI1), (b) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI1), (c) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI2), (d) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI2)	208
Figura 86 Costo por metro cuadrado de materiales tradicionales y prototipos propuestos.....	211
Figura 87 Paredes de bloque en intemperie	213
Figura 88 Medición y pesado de cada una de las paredes de bloque	214
Figura 89 Costo energético de producir distintos materiales de ingeniería	220

Figura 90 Vigas de madera parcialmente carbonizadas tras incendio. Por fuera aparentan estar totalmente quemadas, pero se conserva su sección.	223
Figura 91 Transmisión de sonido en muros o techos	225
Figura 92 Preservantes de madera ante agentes patógenos	227

RESUMEN

Enfocarse en innovar el sector de la construcción utilizando bio-recursos naturales y renovables del país, es importante debido a que la industria de la construcción es en la actualidad la más contaminante de todas. En Ecuador no se ha desarrollado el potencial que tienen las especies maderables para reducir el impacto ambiental que se produce al usar materiales convencionales. En esta investigación se realizó un estudio experimental cuyo fin fue determinar el comportamiento mecánico de prototipos de tablero estructural tipo sándwich, elaborados en base a madera de melina (*Gmelina arborea*) y balsa (*Ochroma pyramidale*). Se realizaron un total de 46 muestras, bajo los modos mecánicos de compresión, flexión, tracción y corte, además se determinó propiedades físicas de densidad y contenido de humedad. Los ensayos de laboratorio se basaron en la normativa vigente ASTM para tableros sándwich. 36 análisis de elementos finitos fueron desarrollados mediante el programa LS-Dyna, con la finalidad de validar los resultados experimentales, obteniendo valores compensados, los cuales permitieron una evaluación de las capacidades estructurales de los tableros propuestos. También se realizó una comparación de los resultados obtenidos con materiales convencionales basándose en parámetros de costo, densidad, peso, resistencia y costo energético. Los resultados demostraron que los tableros sándwich propuestos son hasta 8 veces más livianos que la mampostería tradicional de bloque; y en términos de eficiencia mecánica son 8.3 veces superiores al acero y a su vez poseen un costo de producción energético 23.54% menor que el hormigón y 96.92% menor que el acero.

Palabras clave. –

- **BIORECURSOS**
- **COMPORTAMIENTO MECÁNICO**
- **EFICIENCIA MECÁNICA**
- **ANÁLISIS FINITO DE ELEMENTOS**

ABSTRACT

Nowadays the construction industry is a major source of global pollution, so that, proposing innovative biomaterials is highly relevant. The potential of using wood species for further eco-friendly developments it has unfortunately not been tapped in Ecuador in order to propose feasible alternatives to reduce/replace conventional materials. The research that constitutes this thesis aimed at determining, evaluating and analysing the mechanical performance of lightweight bidirectional sandwich-like structure wall panels made of balsa core material and melinawood external veneers. A total of 46 test specimens were carried out under the mechanical modes of compression, bending, shear and tension with the corresponding determination of density and moisture content. Lab tests were performed in accordance to the current American Society for Testing and Materials (ASTM) building standards. 36 finite element analyses (FEA) were performed over three dimensional (3D) finite element (FE) models using the commercial software LSDyna. The analyses allowed validating and compensating the acquired experimental results, which in turn were useful to evaluate the structural capabilities of the proposed panels, and to compare them with conventional building materials in terms of cost, energy production, density, weight and structural stiffness and strength. The acquired results denote enhanced sandwich wall biopanel which in terms of mechanical efficiency are up to 8.3 times greater than an equivalent steel section, and up to 8 times lighter than equivalent sections of solid wall bricks and concrete block walls. Moreover, the proposed panels involve 23.54% and 96.92% less energy cost production than concrete and steel, respectively.

Keywords. –

- **BIORESOURCES.**
- **MECHANICAL PERFORMANCE**
- **MECHANICAL EFFICIENCY**
- **FINITE ELEMENT ANALYSIS**

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En los últimos años Ecuador ha experimentado uno de los más fuertes eventos sísmicos en su historia, este además de dejar pérdidas humanas invaluable, ha expuesto los errores que existen en la manera de construir del país, todo esto por aferrarse a materiales de construcción tradicionales como hormigón y acero. La razón de buscar nuevos materiales para la industria de la construcción es la de salvaguardar la vida de las personas que viven dentro de las estructuras, ya que la mayoría de muertes durante eventos sísmicos se debe al colapso parcial o total de elementos no estructurales como son las paredes.

Es por esta razón que surge el presente proyecto de investigación, el cual busca encontrar un material estructural tipo sándwich, desarrollado a base de biomateriales de la zona, que presente altas propiedades mecánicas por unidad de masa (eficiencia mecánica), además de ligereza, alta resistencia a esfuerzos y estabilidad dimensional; por medio de la bio-mimetización de especies de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) y melina (*Gmelina arborea*), en un solo material compuesto.

Para llegar a esto se realizará un análisis experimental y un análisis de modelación computacional, el primero con el objetivo de caracterizar el comportamiento mecánico de los tableros estructurales tipo sándwich, en base a ensayos de laboratorio siguiendo la normativa seleccionada, y el segundo para determinar cuál es el comportamiento del

material compuesto ante cargas de servicio axiales y laterales, modelando el material compuesto en un programa de análisis de elementos finitos (FEM/FEA) y a su vez comparar los resultados obtenidos de manera experimental, con el fin de compensarlos y obtener resultados reales.

1.2. Antecedentes

Ecuador es un país de América del Sur que se encuentra en el anillo de fuego del Pacífico (orilla del Pacífico), área donde actividades geológicas y volcánicas, como terremotos o erupciones respectivamente, se producen con frecuencia. De hecho, es una de las regiones geológicamente más activas del planeta (Hinga, 2015). Ecuador ha experimentado importantes actividades sísmicas como consecuencia de su ubicación tectónica. En enero de 1906, por ejemplo, Esmeraldas fue golpeada por un terremoto de 7,8 MW (Magnitud de Momento) que dejó grandes pérdidas humanas y económicas (Beauval et al., 2010). El 16 de abril de 2016, la costa del Ecuador, particularmente Manta, Pedernales y Portoviejo, sufrió graves daños por un terremoto de 7,8 MW. En este evento catastrófico, aproximadamente 670 personas murieron y 6.300 personas resultaron heridas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016).

La mayoría de muertes causadas por terremotos se deben al colapso de estructuras, al deterioro de materiales en la construcción (Kenny, 2009) y en el caso del desastre ocurrido en Ecuador, la situación se agravó debido a las diversas edificaciones que no cumplían con los estándares mínimos para soportar riesgos sísmicos. El número total de viviendas afectadas fue de 35.000, de las cuales 19.500 fueron totalmente destruidas (SENPLADES, 2016). La falta de normas se extiende a los materiales de

construcción como el acero y el hormigón, cuyas especificaciones a menudo no son las que se requieren; la calidad de los materiales no cumple con requisitos de construcción, y las prácticas de construcción aplicadas eran muy pobres. El uso de arena marina en hormigón causó alto nivel de corrosión en barras de acero y la deformación intensa de agregados gruesos (milionización), que produjeron materiales de muy baja resistencia. Estos hechos fueron los principales motivos de colapso de los edificios de la zona afectada (Yépez & Yépez, 2017).

Por lo tanto, es fundamental para la industria de la construcción en Ecuador repensar el uso de materiales de ingeniería, que entre otros aspectos puedan reemplazar las paredes de mampostería convencional, para evitar muertes provocadas por el efecto de volcamiento de las mismas sobre las personas en desastres naturales. A pesar de algunas ventajas (por ejemplo, resistencia al fuego y durabilidad) ofrecidas por estructuras de construcción típicas hechas de materiales convencionales (por ejemplo, acero, hormigón, ladrillos) (Beall, 2000), su falla parcial o colapso total durante eventos sísmicos extremos puede conducir a consecuencias críticas.

Desafortunadamente, parte del área afectada por el terremoto del 16 de abril del 2016 se continúa reconstruyendo utilizando los mismos métodos y materiales de construcción tradicionales. El aspecto curioso del proceso de reconstrucción es que grandes cantidades de concreto y acero se transportan diariamente al sitio del proyecto de construcción, mientras que plantaciones masivas de biomateriales con características óptimas para la construcción (por ejemplo, bambú, arboles de melina y balsa) circundan las zonas de reconstrucción y se mantienen intactas hasta la fecha.

Por otra parte, la producción de materiales convencionales tales como hormigón, acero y mampostería de bloque, genera un consumo energético, especialmente en su fase de producción, que a su vez se traduce en el aumento de los gases “invernadero”, que retienen en parte el calor del sol en la atmósfera, produciendo una alteración en los efectos meteorológicos. El dióxido de carbono (CO₂) es el subproducto negativo más importante producido en la fabricación de materiales de construcción (Buchanan & Honey, 1994).

La madera representa una alternativa óptima para materiales de construcción ligeros no convencionales, ya que brinda una solución natural que puede ser explotada con fines constructivos. La madera es un biomaterial que ofrece una combinación de alta elasticidad, buena resistencia y bajo peso, cualidades necesarias a la hora de ser sometidos a esfuerzos internos y externos (Thelandersson & Larsen, 2003).

Por consiguiente, los productos derivados de la madera, no solo poseen ventajas mecánicas sino también ecológicas y su huella medioambiental es menor que la de los materiales de construcción convencionales, pues requieren menos energía y, por tanto, sus emisiones de CO₂ son inferiores a las del acero y el hormigón (Buchanan & Levine, 1999). La construcción con acero y concreto produce entre 20 y 9 veces más emisiones de CO₂, respectivamente, comparado con la madera estructural (Gregg et al., 2008).

Dentro de la madera estructural se puede encontrar a las bio-estructuras tipo tubular o sándwich que tienen menor densidad en su interior y mayor densidad en su exterior, poseen la combinación óptima entre flexibilidad (módulo de elasticidad, MOE) y rigidez (módulo de ruptura, MOR). Este tipo de innovaciones no han sido desarrolladas

aún en el país por desconocimiento del comportamiento mecánico estructural de los biomateriales en términos de eficiencia mecánica, la cual busca un alto performance mecánico en una cantidad mínima de masa, también se ha detenido el desarrollo de bioestructuras debido a los aspectos culturales que se tiene en Ecuador, ya que aún se da preferencia a materiales de construcción convencionales (bloque, hormigón, acero) y no se aprovecha los materiales de construcción no-convencionales (bambú, madera de melina, madera de balsa), que circundan en su sector.

1.3. Planteamiento del problema

Problema Macro. – En casi la totalidad de terremotos a nivel mundial, las personas fallecen debido al aplastamiento causado por materiales de construcción convencionales (véase Figura 1 y 2). De hecho, se ha convertido en una generalidad que las personas que necesitan asistencia médica luego de los terremotos presenten lesiones traumáticas causadas por la caída de materiales de mampostería (Ministerio de Salud de Argentina, 2015).



Figura 1 Pared de mampostería caída después del terremoto de abril del 2016

Fuente: (El Comercio, 2016)



Figura 2 Pared de mampostería caída sobre autos Avenida Juan Carlos I de Lorca, después del terremoto del 2011

Fuente: (Geological man, 2016)

Actualmente, el mundo se enfrenta a grandes problemas ambientales, como el calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y la acumulación de residuos, entre otros. Recientes investigaciones indican que en las últimas décadas el clima mundial ha cambiado rápidamente y también revelan que estos cambios aumentarán exponencialmente en los próximos años (Sharma et al., 2011). La industria de la construcción tradicional siempre ha sido un problema medioambiental, ya que desde sus inicios ha llegado a consumir el 50% de todos los recursos mundiales, convirtiéndose en la actividad menos sustentable del planeta y sin ninguna oportunidad de retribuir algo a la naturaleza (Cabo Laguna, 2011).

Problema Meso. – La construcción informal que se presenta en Latinoamérica acarrea problemas en todo sentido, pero estos se ven agravados durante eventos sísmicos. A lo anterior se suma que no ha existido innovación de sistemas constructivos en esta región, lo cual ha provocado que existan muertes que se pudieron evitar a causa del colapso de estructuras y paredes de mampostería. Al no cambiar la metodología de construcción en América Latina, la contaminación producida por construcciones con materiales convencionales no disminuirá, por ende, mientras más aumente la población, la contaminación ambiental también aumentará en iguales o mayores proporciones.

A su vez, existe dificultad en determinar la magnitud de la informalidad de la construcción, pues los censos no los registran como una unidad de análisis, la aproximación más eficaz es la que nos da Fernandes (2011), la cual indica que la informalidad en las grandes ciudades de Latinoamérica es aproximadamente entre el 10% y el 33% del total de las residencias en las zonas urbanas. La informalidad es

provocada por varias razones: carencia de suelos con servicios públicos, bajos ingresos económicos, mal planeamiento urbano o hasta un sistema legal disfuncional. La informalidad conlleva a aspectos perjudiciales para sus residentes como: derechos civiles no equitativos, discriminación del resto de la población, hasta peligros de salud y peligros ambientales.

Problema Micro. – El último sismo de magnitud 7.8 MW registrado el sábado 16 de abril del 2016, en la costa norte de Ecuador, ha sido uno de los mayores sismos presentados en este país y ocasionó un daño enorme a nivel social y económico. Según la Secretaría de Gestión de Riesgos (2016) el 70% de las viviendas de la parroquia Tonsupa presentaron daños en su estructura, estas se reflejan en fisuras, grietas y colapso de paredes de mampostería (véase Figura 3).

Por otra parte, en el poblado de Atacames un 40% de la infraestructura hotelera tuvo daños significativos y dentro de este valor el 20% de viviendas presentó caída de materiales de mampostería, colapsos que se pudieron evitar con un control adecuado de procesos constructivos (Bonilla, 2016).



Figura 3 Hotel Fogón Manabita, en el malecón de Tonsupa, presenta fisuras, grietas y colapso de paredes de mampostería
Fuente: (Bonilla, 2016)

Según Vizueté (2011), la construcción informal en el país es casi del 70%. La construcción actual en Ecuador genera alrededor de 10.6 Gt (Giga tonelada) de emisiones de CO₂ cada año y se predice que para 2030, las emisiones aumentarán a 14.3 Gt CO₂ si no se cambia la metodología actual de construcción a base de materiales convencionales (Lloret, 2011). Por consiguiente, se hace imperante desarrollar un sistema constructivo alternativo en base a biomateriales (madera de melina, madera de balsa, bambú), que cumpla con los requisitos para ser usado en construcción y que contribuya a disminuir la cantidad de emisiones de CO₂, hacia el ambiente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Proponer un bio-elemento alternativo de pared no convencional, mediante la combinación de las propiedades físico mecánicas de dos especies; específicamente madera de melina (*Gmelina arborea*) y balsa (*Ochroma pyramidale*), que se fusionan en un material compuesto que a la vez es un tablero estructural tipo sándwich, con propiedades mecánicas y estructurales capaces de reemplazar las paredes de mampostería tradicional, en proyectos de construcción ubicados en áreas de alto riesgo sísmico del Ecuador.

1.4.2. Objetivo Específicos

- Determinar los métodos y ensayos a utilizar en laboratorio, mediante revisión bibliográfica de normas destinadas a la elaboración de tableros estructurales tipo sándwich.
- Elaborar un prototipo de tablero estructural tipo sándwich, mediante la combinación de biomateriales sustentables.
- Realizar pruebas físico mecánicas en prototipos de tablero estructural tipo sándwich, mediante ensayos de laboratorio basados en la normativa seleccionada.
- Realizar estudios de modelación computacional, mediante el análisis de elementos finitos con el programa LS_DYNA, para analizar el comportamiento estructural de los tableros estructurales tipo sándwich ante cargas de servicio axiales y laterales.

- Comparar las características mecánicas del tablero estructural tipo sándwich con paredes de mampostería convencional, mediante los datos obtenidos en base a ensayos de laboratorio aplicados al tablero y datos recopilados de investigaciones sobre paredes de mampostería tradicional correspondiente.

1.5. Justificación e Importancia

El presente estudio surge de la necesidad de proponer un tablero estructural tipo sándwich compuesto en base a madera de melina (*Gmelina arborea*) y balsa (*Ochroma pyramidale*), que sea ambientalmente amigable y estructuralmente óptimo, para utilizarlo como alternativa constructiva no convencional en proyectos de vivienda, destinados a reconstruir las áreas destruidas por el terremoto de abril de 2016.

Adicionalmente explotar los bio-recursos naturales de la zona, como en este caso lo es la melina (*Gmelina arborea*) y la balsa (*Ochroma pyramidale*), para conformar tableros compuestos que trabajen como muro estructural de manera óptima. Esta propuesta se reflejará de manera directa en la disminución de contaminación por efectos de CO₂ en la atmósfera, ya que la construcción con acero y concreto produce entre 20 y 9 veces más emisiones de CO₂, respectivamente, comparado con la madera estructural (Gregg et al., 2008).

Se espera que la inclusión efectiva de estos tableros en la industria constructiva de zonas con alto riesgo sísmico, ayude a disminuir el número de viviendas afectadas ante eventos catastróficos futuros, impidiendo la caída de mampostería de bloque y ladrillo, sustituyendo estos materiales por un producto creado con biomateriales en base

al concepto de eficiencia mecánica, con el propósito de evitar víctimas innecesarias causadas por el volcamiento de paredes de mampostería.

1.6. Alcance

Este proyecto de investigación pretende realizar dos tipos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich, los cuales tendrán paneles externos de madera de melina (*Gmelina arborea*) y en núcleo paneles de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*), de los cuales se determinará sus propiedades mecánicas, puntualmente ensayos de flexión a cuatro puntos, compresión, corte y tracción. También se realizará un modelo computacional de los prototipos de tablero tipo sándwich en el que se someterá el material a cargas de servicio axiales y laterales para determinar su comportamiento ante este tipo de sollicitaciones. De igual forma se realizará una comparación con elementos convencionales de mampostería para determinar cuan beneficioso es el proyecto.

CAPITULO II

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes Investigativos

En la última década el desarrollo de tecnologías ha tenido un ascenso evidente en nuevos métodos de construcción, los cuales hace poco tiempo no pasaban de ser experimentos de laboratorio.

Ahora la prioridad de los diseñadores de ingeniería es buscar materiales livianos, resistentes, económicos y amigables para el ambiente (Baeza & Chuil).

Un trabajo relacionado con el tema actual de investigación es el presentado por el profesor Salvador Martínez (2012), de la Universidad de Oviedo, en su tesis doctoral: “Durabilidad, bajo condiciones climáticas, del panel compuesto ligero autoportante, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, que se emplea como sistema de cerramiento de cubiertas”, en la cual realiza un estudio sobre la degradación producida por factores ambientales como humedad y temperatura, en tableros compuestos tipo sándwich con paneles exteriores de madera, empleado como cubierta de tejados. Esta investigación se enfoca en responder diversas cuestiones sobre el envejecimiento de los tableros sándwich por causa de la temperatura y la humedad, así como cuál es el comportamiento mecánico del tablero cuando este se encuentra envejecido. Para realizar el ensayo se utilizaron 80 muestras en grupos de cinco muestras cada uno, ensayados en diferentes ciclos climáticos y bajo diferentes modos mecánicos.

Este estudio demostró que, si los cambios en las condiciones ambientales son moderados, las propiedades mecánicas no experimentan disminución en probetas sometidas a envejecimiento natural. En el presente trabajo se tomará en cuenta la determinación de ventajas al trabajar con nuevos materiales de construcción, además el análisis del comportamiento de tableros sándwich de cubierta ante condiciones naturales y la relación entre sus propiedades mecánicas con su degradación o envejecimiento que presenta Martínez (2012) en su investigación.

Otro de los factores importantes a la hora de realizar y utilizar tableros estructurales tipo sándwich es como varían sus propiedades mecánicas conforme las dimensiones de sus materiales se modifican, un caso parecido se desarrolla en el trabajo de Ramirez et al. (2014), de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, en su estudio llamado "Desarrollo de tableros tipo sándwich", desarrolla tableros tipo sándwich con núcleo de espuma y paneles exteriores elaborados con fibra de vidrio y resina poliéster, para ser empleados como elementos de cimbra. Ramirez et al. (2014) diseñó, elaboró y evaluó tableros en el modo mecánico de flexión, en el cual varió el espesor y densidad del núcleo junto a la composición de las pieles.

Los ensayos se realizaron en muestras de tablero tipo sándwich con núcleo a base de politereftalato PET con densidades de 110,120 y 150 kg/m³ y con espesores de 13 mm y 19 mm. Los resultados mostraron que los tableros ofrecen mayor rigidez conforme se aumentan las dimensiones de sus materiales (Ramirez et al., 2014). Este estudio será utilizado como base para identificar cuál es la relación entre peso y propiedades

mecánicas, cuando se varían las dimensiones y composición de los materiales del tablero estructural tipo sándwich.

La finalidad de la elaboración de tableros estructurales tipo sándwich es disminuir la mortalidad por movimientos telúricos, que se produce en regiones de alto riesgo sísmico, para esto es necesario tomar medidas preventivas directamente en el medio de transmisión del temblor, el cual es la estructura, esto se puede hacer disminuyendo el peso de la estructura mediante la implementación de materiales cuya densidad sea menor. Los tableros estructurales que se analizan en esta investigación tienen densidades competitivas en este ámbito, pero no tienen una clasificación propia que las identifique de alguna manera.

En consecuencia a lo anterior, se analiza el trabajo presentado por Cuevas (1988), de la Universidad Austral de Chile, titulado “Un criterio de selección y consideraciones de uso de la madera en construcción”, en el que habla sobre una manera de selección de especies comerciales maderables para ser usadas como material de construcción, en base a una valoración de estabilidad dimensional, durabilidad natural y el comportamiento de la superficie, también trata temas especiales sobre la humedad relativa de uso y las precauciones constructivas que se deben considerar (Cuevas, 1988).

En su trabajo Cuevas (1988), identifica rangos de madera en las que la clasifica según su densidad, partiendo desde muy liviana hasta muy pesada. Considerando que el problema a mitigar en las edificaciones es el peso excesivo y que el tablero esta realizado en base a biomateriales; se usará esta clasificación para definir qué tipo de

materiales se usarán y cuáles serían sus posibles ventajas frente a materiales de construcción convencionales (acero, hormigón).

2.2. Fundamentación teórica

2.2.1. Eficiencia mecánica

La eficiencia mecánica de una planta para resistir fuerzas externas como la gravedad (biomasa), el viento y el agua de lluvia depende de la relación característica entre su forma (morfología), estructura del material (anatomía) y función (Gonzalez Mosquera et al., 2014).

La eficiencia mecánica en biomateriales está definida como el rendimiento mecánico por su unidad de masa (Gonzalez & Nguyen, 2015). Para especies maderables específicamente, la eficiencia mecánica se la puede definir como el rendimiento del tallo para resistir diferentes requisitos que son de naturaleza mecánica, como la necesidad de soportar cargas estáticas y dinámicas creadas por la masa del organismo o por la carga del viento, la necesidad de liberar energía elástica almacenada, de flexionar grandes ángulos, de resistir el pandeo y la fractura. La mayoría de los materiales naturales son sostenibles, reciclables y en caso de eliminación, son biodegradables, lo que los convierte en un excelente ejemplo para la ingeniería ambientalmente consciente (Wegst & Ashby, 2004).

Se identifican a los materiales mecánica y estructuralmente eficientes cuando poseen alta flexibilidad (MOE) y buena resistencia a esfuerzos (MOR), ante una menor densidad.

En la Figura 4(a), se presentan los rangos de las propiedades mecánicas para materiales de ingeniería, relacionando flexibilidad (MOE) con densidad básica; de igual manera en la Figura 4(b), se presenta la relación de módulo de elasticidad (MOE) contra densidad para maderas y sus constituyentes (Gibson, 2012).

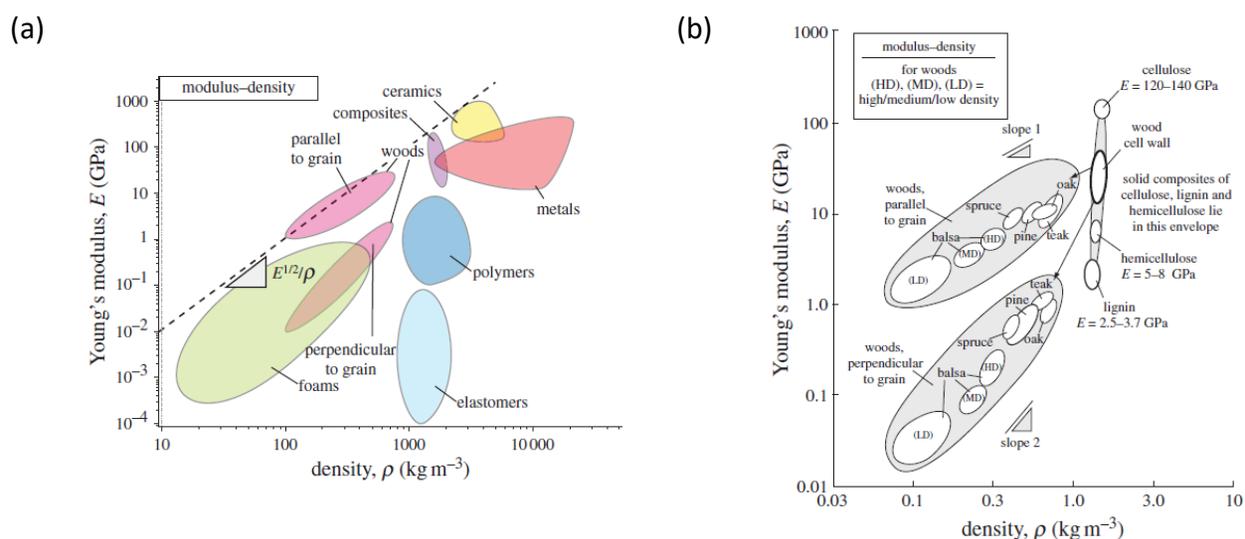


Figura 4 (a) Flexibilidad (MOE) vs densidad seca de materiales de ingeniería (b) Flexibilidad (MOE) vs densidad seca para maderas y sus constituyentes.
Fuente: (Gibson, 2012)

Muchas de las bio-estructuras presentes en la naturaleza se caracterizan por tener mejores cualidades para elevar su rendimiento mecánico, dentro de estas se encuentran las tipo tubular y tipo sándwich que maximizan su resistencia biomecánica, mientras que minimizan la cantidad de material utilizado. Un ejemplo claro de este tipo de estructuras en la naturaleza es la palma de coco, este es un tejido vegetal complejo que representa una estructura que consiste en haces fibrovasculares y un tejido que los rodea.

Las células dentro de los haces fibrovasculares son fibras con una estructura parecida a un panel, mientras que el tejido que los rodea está formado por parénquima

con células poliédricas similares a la espuma. La composición y estructura de estos elementos, junto con una alta densidad relativa de los haces fibrovasculares, da lugar a altas propiedades mecánicas por unidad de masa (Butterfield & Meylan, 1997; Gibson, 2012; González Mosquera, 2015).

De igual forma se asemeja a una estructura tipo sándwich ya que posee diferentes densidades entre su núcleo y su periferia, dando la impresión de ser un conjunto de materiales de distintas características, pero que se complementan para maximizar su rendimiento mecánico.

Por lo tanto, se puede biomimetizar el comportamiento de esta bio-estructura tipo sándwich en base a dos biomateriales que pese a ser diferentes combinen sus características para obtener una alta eficiencia mecánica. Se combinarán las propiedades físicas y mecánicas de dos especies naturales que son: balsa (*Ochroma pyramidale*) que le dará alta flexibilidad a la estructura y melina (*Gmelina arborea*) que en forma de cross laminated timber (CLT) les dará alta resistencia a esfuerzos, para así obtener un tablero compuesto tipo sándwich que posea un alto performance mecánico por unidad de masa.

2.2.2. Engineering Wood Products (EWPs)

Para introducir estos conceptos, es importante hablar sobre la madera, la cual procede de los árboles, que son plantas perennes (viven durante varios años), el origen de las características que posee la madera depende del árbol del cual proviene (Durán, 2004). Se entiende por madera a las partes del árbol que se pueden aprovechar, usualmente el tronco y en casos especiales hasta sus raíces y ramas. La madera proveniente de troncos se la puede usar de varias maneras, como: láminas trituradas en

tableros, chapas finas o elementos macizos para obras de carpintería y construcción; además, es una fuente de nitrocelulosa, celulosa, ácidos y aceites para la industria química; mientras que la madera de raíces y ramas se la utiliza para obras finas de carpintería y en su forma triturada para la obtención de medicamentos regionales o resinas (Aguilar & Guzowski, 2011).

A lo largo de la historia se ha evidenciado que la madera es uno de los materiales estructurales más usados por el ser humano (Durán, 2004).

Guss (1995), define a los engineered wood products (EWPs), como un producto estructural hecho de pequeñas piezas de madera, o un producto estructural que ha sido realizado en base a residuos provenientes de procesos de industrialización de la madera. Estos elementos se adhieren con distintos tipos de agentes de unión, para obtener un producto con propiedades mecánicas elevadas.

En algunos países del mundo (Canadá, Estados Unidos, Francia, Alemania, Australia), el uso de la madera en la industria de la construcción (propósitos estructurales) es mucho más frecuente. Allí, se ha sustituido la madera sólida (normalmente utilizada como vigas y columnas), por elementos ingenieriles derivados de la madera (EWPs) (G. Castro, 2006).

El éxito que han tenido estos productos obedece a; (i) la optimización del performance físico-mecánico de la madera, logrado a través de la apropiada selección de materia prima y una composición regulada, con el fin de obtener productos isotrópicos y homogéneos, (ii) la disminución del tiempo de construcción, menor peso de la estructura

completa, por lo que se disminuye la dimensión del cimiento, lo cual conlleva a una reducción del costo de construcción, y (iii) el tiempo de vida útil prolongado, alcanzado a través de mecanismos físicos o químicos (tratamientos específicos, elección de adhesivos apropiados) (G. Castro, 2006). Existen varios tipos de EWP's entre los cuales se puede nombrar a los siguientes:

Cross laminated Timber (CLT): Tableros de madera maciza compuestos de varias láminas de madera, por lo general, dispuestas en ángulo recto, colocadas de forma plana en cruz una sobre otra (véase Figura 5). La disposición de sus láminas permite que los CLTs funcionen de manera bidireccional ante esfuerzos mecánicos. Sus usos más comunes son en paredes y pisos (Toosi, 2011).

La estratificación transversal ofrece ventajas en términos de capacidad de carga en dos direcciones, mayor capacidad de corte en el plano de los elementos y eliminación de la contracción e hinchamiento en el plano como resultado de las variaciones de humedad. Otras ventajas son un alto nivel de prefabricación donde las aberturas para puertas y ventanas ya se pueden incluir en la fábrica, fácil fijación de los elementos en el sitio y un bajo peso en comparación con hormigón de uso tradicional (Van De Kuilen et al., 2011).



Figura 5 Muestra de CLT elaborado a base de Gmelina arbórea y tomado de uno de los prototipos usados en esta investigación

Laminated veneer lumber (LVL): Es un producto de ingeniería versátil y combina lo mejor de la tecnología de procesamiento moderno con la belleza estética de la madera natural. Se ha utilizado estructuralmente durante varios años en América del Norte, Australia y en muchos países europeos.

LVL se compone de laminaciones paralelas de chapa, encoladas y procesadas juntas para formar un material de espesor similar al de la madera aserrada (véase Figura 6). Generalmente el grano de cada capa corre en la misma dirección (larga), dando como resultado mejores cualidades cuando este elemento se carga como una viga o utilizada como un tablón. Sus aplicaciones van desde edificios públicos, grandes edificios prefabricados, componentes de productos y almacenes industriales hasta casas de madera personalizadas. En resumen, LVL proporciona una solución ideal, cuando

características como durabilidad, peso ligero y precisión dimensional son esenciales (Neuvonen et al., 1998; Palermo et al., 2005).



Figura 6 Laminated Veneer Lumber
Fuente: (Neuvonen et al., 1998)

Veneer Based Composite (VBC): Postes de madera hueca compuestos de madera laminada a base de chapa, fabricados a partir de árboles (véase Figura 7) (Underhill et al., 2014).

Las secciones huecas de VBC se están desarrollando actualmente y se consideran una posible solución para cumplir con una gama de aplicaciones, ofreciendo nuevas oportunidades de mercado. Estas nuevas secciones tienen la ventaja de tener formas de sección transversal eficientes y pueden fabricarse en grandes tamaños (Gilbert et al., 2017) .



Figura 7 Poste de transmisión eléctrica elaborado en base a coconut veneers based composites.

Fuente: (Gilbert et al., 2014)

Glulam: Madera laminada encolada que se utiliza en conjunto para elaborar elementos más resistentes (véase Figura 8) (Ong, 2015). Un glulam es una madera estructural sólida que se construye a partir de dos o más capas de madera dimensional (es decir, madera que se corta y seca al horno a un ancho y profundidad estandarizados) que se unen con un adhesivo estructural resistente a la humedad. Los miembros de madera dimensionales (lams), están contruidos de manera que el grano corre paralelo a la longitud de los miembros.

Los glulams ofrecen ventajas sobre grandes elementos de madera maciza, ya que tienden a una mejor estabilidad dimensional. Las maderas más grandes de madera aserrada tienden a sufrir cambios dimensionales a medida que se secan. Los glulams están hechos de madera dimensional más pequeña que ya se secó y, por lo tanto, son dimensionalmente estables antes de ensamblarse en el Glulam terminado. Típicamente

cuestan menos que las maderas de corte sólido de tamaño equivalente porque están construidas con madera dimensional estándar (Header, 2016).

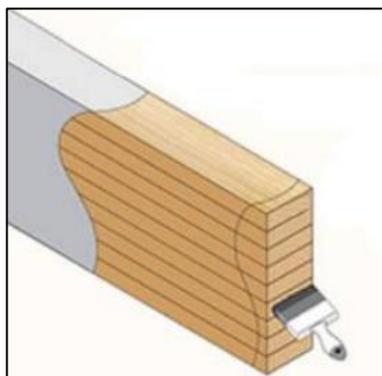


Figura 8 Glulam
Fuente: (Ong, 2015)

Oriented Strand Board (OSB): Los tableros OSB o de fibras orientadas (oriented strand board) son tableros formados por sucesivas capas de virutas de varios centímetros, donde cada capa es prensada con las virutas orientadas en la misma dirección, y se van uniendo las capas, al igual que con los tableros contrachapados, de forma bidireccional para conseguir una mayor estabilidad y resistencia, lo que los convierte de diversas maneras en una alternativa a la madera maciza (véase Figura 9)(Jacobo, 2004).



Figura 9 Oriented Strand Board
Fuente: (Alías & Jacobo, 2011)

El origen de estos paneles se dio en el año de 1980 y en esta época solo se utilizaban como cerramiento, pero desde hace tiempo atrás, se ha empezado a producir paneles con capacidad estructural de transmitir cargas (Alías & Jacobo, 2011).

Este tipo de material trata de combinar tres características: estructural – constructiva – ecológica. Ya que la madera aprovechada no en forma masiva, representa una alternativa apropiada dentro de los servicios civiles, a su vez, da una buena perspectiva ecológica, ya que ayuda a la reducción de gases de invernadero, que se encuentran en nuestra atmosfera (Jacobo, 2004).

2.2.3. Estructura tipo sándwich

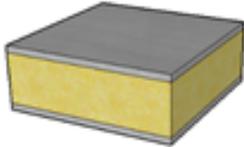
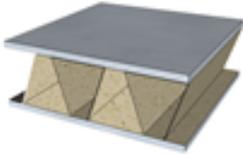
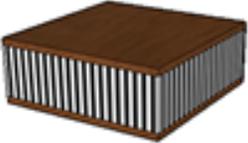
Los tableros estructurales tipo sándwich suponen un avance conceptual en el diseño estructural de sistemas de paredes ya que permiten diseñar estructuras de elevada rigidez y resistencia, con bajo peso.

A diferencia del diseño estructural con materiales de construcción convencionales (aceros, aleaciones de aluminio), cuyas propiedades se consideran isotrópicas, son reproducibles y pueden obtenerse fácilmente a partir de ensayos convencionales de tracción, el diseño de estructuras realizadas con tableros estructurales tipo sándwich presenta una complejidad más elevada, ya que el comportamiento de su estructura, depende de un elevado número de factores, tanto del diseño del propio tablero estructural tipo sándwich, como de la configuración geométrica de la estructura (Otero, 2012).

Debido a que el empleo de este tipo de materiales es cada vez más frecuente, es necesario caracterizar su comportamiento estructural, como distribuciones de tensiones, deformaciones, cargas de pandeo y construcción (Rivera, 2017).

En la Tabla 1, se presentan materiales comunes para paneles exteriores y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del tablero estructural tipo sándwich.

Tabla 1
Pieles y núcleos de paneles tipo sándwich

TIPOS	PIELES	NÚCLEOS
Expandido	Metales	
	Laminados	Espuma de poliuretano
	Contrachapados termoplásticos	Espuma de poliestireno
Placa nervada	Amianto/ Cemento	Metal
	Metales	Material compuesto
	Laminados	
Nido de abeja	Contrachapados	Madera
	Laminados	Nido de abeja de cartón
	Aluminio	Nido de abeja de aluminio

Fuente: Modificado de Otero (2012)

Los tableros estructurales tipo sándwich pueden ser construidos de una gran variedad de formas y con una gran variedad de materiales, pero la mayoría de las estructuras sándwich son empleadas en construcciones aeronáuticas y automovilísticas debido a su alto performance mecánico.

Entre las ventajas más favorables de las estructuras tipo sándwich dentro del campo de su aplicación, cabe mencionar (i) la ligereza, (ii) rigidez a flexión, (iii) aislamiento térmico, (iv) alta resistencia específica, (v) mantenimiento reducido, (vi) flexibilidad en el diseño, y (vii) durabilidad. Dichas características hacen posible el empleo de este tipo de materiales en diversos sectores industriales: aeronáutico, automovilístico, naval y construcción (Carabaño Rodríguez et al., 2014). Las estructuras tipo sándwich están conformadas por dos láminas delgadas (layers) o paneles exteriores que encierran al núcleo. Esquemáticamente, se muestra la configuración de este tipo de materiales en la Figura 10.

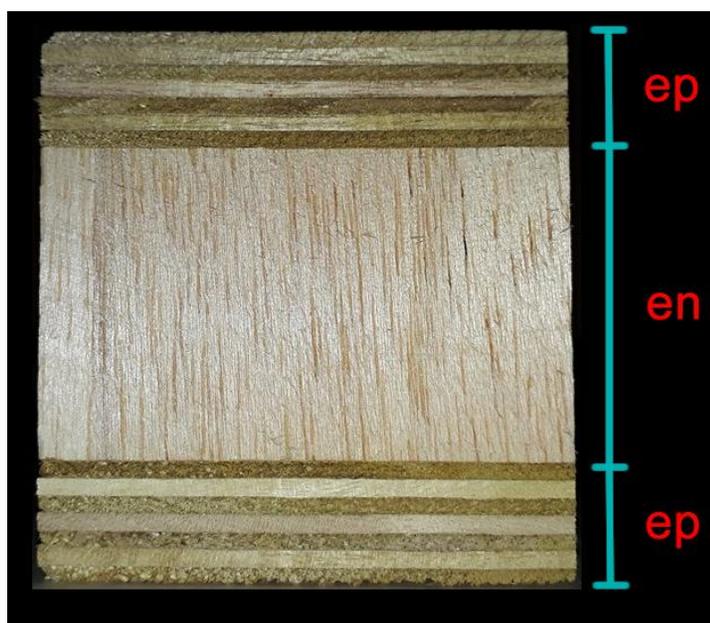


Figura 10 Esquema de una estructura tipo sándwich elaborado en base a paneles externos de melina (*Gmelina arborea*) y un núcleo de balsa (*Ochroma pyramidale*)

En este tipo de estructuras las caras elaboradas en base a material compuesto, resisten prácticamente todas las cargas en el plano y los momentos fuera del mismo, a

su vez proporcionan rigidez a flexión al tener un módulo de elasticidad (MOE) más elevado que el del material de núcleo.

El núcleo genera distancia entre los paneles exteriores y transmite el cortante como si fuese flexión alrededor del eje neutro del compuesto. De igual manera, también suministra rigidez a corte a través del espesor y estabiliza las cargas en los paneles exteriores, así estas pueden soportar mejores sollicitaciones a cargas de tensión.

El concepto básico de la funcionalidad del tablero estructural tipo sándwich, en lo que respecta a resistencia mecánica, dice que al separar las caras (incrementar distancia) aumenta la rigidez a flexión. El material del núcleo se escoge con el fin de disminuir el peso de la estructura y debe tener compatibilidad con el material de los paneles externas, para poder unirlos correctamente en un solo elemento. Si la elección de materiales es adecuado se pueden conseguir relaciones de rigidez y resistencia frente a cargas mayores de las que se consiguen en otro tipo de estructuras (Otero, 2012).

Es por esto que este proyecto se centra en el estudio de tableros estructurales tipo sándwich, cuyo núcleo será un panel macizo realizado a base de madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) y sus pieles serán constituidas de material compuesto, reforzado con fibras en dos direcciones (CLT) a base de madera de melina (*Gmelina arborea*).

La estructura tipo sándwich es un material de construcción ecológico debido que el uso de madera para edificios estructurados ha demostrado tener un significativo número de ventajas incluyendo, la captación de carbono de la atmósfera, la reducción de las emisiones y la rentabilidad en comparación con el hormigón y el acero. Ahora, se ha

encontrado que este producto es un material de construcción alternativo, que combina adecuadamente todas las ventajas de una estructura sólida mientras se produce a partir de un bio-recurso sostenible (Stauder, 2013). El núcleo se puede definir como aquel elemento de baja densidad y bajas características mecánicas que separa los revestimientos en una estructura sándwich, (suele denominarse núcleo o core).

Dentro de los diferentes núcleos para tableros tipo sándwich, se suele emplear con frecuencia estructuras tipo "nido de abeja" (honeycomb-like structures), en la cual se emplean láminas delgadas unidas unas a otras con el fin de formar un conjunto de células interconectadas. Este tipo de configuración del núcleo inicio en China (hace 2000 años) y se ha tenido amplia acogida en la industria aeronáutica (desde 1940).

En lo que respecta a nuestra investigación utilizaremos un núcleo constituido por balsa (*Ochroma pyramidale*), véase en Figura 11.



Figura 11 Muestra de núcleo rígido elaborado a base de balsa (*Ochroma pyramidale*)

El panel exterior del tablero sándwich serán cross laminated timber (CLT) de melina (*Gmelina arborea*), el cual consta de capas de madera encoladas y pegadas transversalmente como se muestra en la Figura 12.

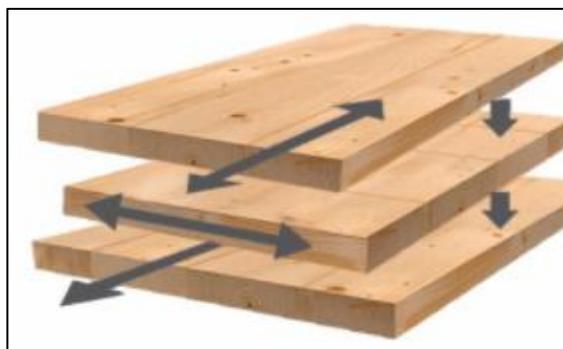


Figura 12 Conformación de un CLT
Fuente: (Stauder, 2013)

Normalmente, los paneles CLT se producen con 3, 5, 7 o más capas que generalmente están limitados por razones técnicas a aproximadamente 500 mm (Van De Kuilen et al., 2011).

2.2.4. Hardwoods y softwoods

Todos los Engineering Wood Products (EWP) se derivan de la madera, que según (Butterfield & Meylan, 1997; Riddle, 2015) se clasifica en dos grandes grupos: hardwoods (maderas duras) y softwoods (maderas blandas); las maderas duras o también llamadas angiospermas, poseen células más desarrolladas que las maderas blandas o llamadas gimnospermas.

La madera dura proviene de árboles poco esbeltos, con hojas anchas y es un árbol de lento crecimiento, tienen un costo mayor que las maderas blandas, contienen una mayor variedad de tipos de células, incluidas fibras de paredes gruesas y también

son más difíciles de trabajar, porque su densidad básica oscila entre 500 y 900 kg/m³, por lo que, se las emplea en vigas y columnas. Mientras que las maderas blandas provienen de árboles altos, que terminan en punta, crecen rápido, poseen hojas en forma de aguja y densidad básica que oscila entre 200 y 400 kg/m³; usualmente son de color claro, están formados predominantemente por traqueidas con solo una pequeña cantidad de parénquima, además son más baratas y son más trabajables que las maderas duras, la madera blanda se usa en componentes de construcción como: ventanas, puertas y tableros de fibra de densidad media (MDF) (Butterfield & Meylan, 1997).

La densidad y dureza de una madera en particular se rige en gran medida por la proporción de células de paredes gruesas presentes, los softwoods poseen una gran proporción de células de parénquima de pared delgada y, por lo tanto, son más livianos que los hardwoods (Butterfield & Meylan, 1997).

2.2.4.1. Melina (*Gmelina arborea*)

La *Gmelina arborea*, comúnmente conocida como melina es un hardwood que pertenece a la familia Verbenaceae, originaria de Asia. Este tipo de especie será utilizada en los paneles externos de los tableros estructurales tipo sándwich en forma de CLT. La melina se cultiva en bosques o zonas húmedas de regiones tropicales, alcanza aproximadamente 1.20 m de diámetro y hasta 30.00 m de altura, con crecimiento medios anuales de 0.036 m en diámetro y 2.00 m en altura posee un tronco sin defectos y casi rectilíneo (véase Figura 13), con una gama de colores desde marrón amarillento hasta blanco grisáceo. La melina llega a un rendimiento en volumen de 20 a 30 m³/ha/año con un ciclo de producción estimado de 12 años (Vinueza, 2012a).

En cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, se puede recalcar un valor de densidad básica al 12% de humedad de 580 kg/m^3 , valores de flexión estática de MOR (Módulo de ruptura) de 94.5 Mpa y MOE (Módulo de elasticidad) de 10327.7 Mpa , mientras que el valor de MOR en compresión paralela al grano es 45.17 Mpa (Vinuesa, 2012a).

Según Vozzo (2010), la melina posee una densidad básica de 420 a 640 kg/m^3 esta especie es característica por poseer color y propiedades físico-mecánicas bastante uniformes comparadas con otras maderas que se usa en la industria.



Figura 13 Árbol de melina (*Gmelina arborea*)
Fuente: (Vozzo, 2010)

Para la plantación de melina se recomienda un espaciamiento entre espécimen de $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ para la producción de madera, aserrío, astillas o desenrollado, mientras que para producir pulpa o leña se puede plantar entre $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (Vozzo, 2010).

Para los paneles exteriores del panel tipo sándwich se utilizarán CLT's conformados de melina originaria de la provincia de Los Ríos-Ecuador, en ciudad de Quevedo, sector "El Vergel", la que será proporcionada por la empresa 3A Composites – Banova®. Este es un producto que se encuentra en proceso de estudio y desarrollo por lo cual la empresa no cuenta aún con la caracterización físico – mecánica de la especie.

2.2.4.2. Balsa (*Ochroma pyramidale*)

La *Ochroma pyramidale* comúnmente conocida como balsa, es un hardwood que pertenece a la familia *Malvaceae*, se cultiva en distintos países como México, Costa Rica, Perú, Ecuador, Bolivia y Brasil, esta especie será utilizada en los tableros estructurales tipo sándwich en estudio como su núcleo.

En Ecuador se encuentra principalmente a lo largo de la Región Costa. Este árbol presenta un tronco recto y cilíndrico, su corteza es gris y de textura lisa, con hojas simples y alternas (véase Figura 14). El árbol pierde su follaje durante una parte del año, la cual coincide en la mayoría de los casos con la llegada de la época de otoño (Fletcher, 1951).



Figura 14 Árbol de balsa (*Ochroma pyramidale*)
Fuente: (Angel, 2017)

Por lo general el crecimiento de la balsa es acelerado, en un año puede alcanzar una altura de 3.5 m y un diámetro de 5 cm o más, y los arboles de cinco a ocho años de edad pueden alcanzar una altura de 18.00 m y 60 a 75 cm de diámetro.

Los árboles se cosechan antes de la madurez biológica la cual se encuentra alrededor de los 12 años. Esta especie tiene una densidad básica que varía entre 50 a 410 kg/m³ dependiendo de la edad y hábitat del árbol (Moncayo Galárraga, 2017). Llegando a un rendimiento en volumen de 17 a 30 m³/ha/año con un ciclo de producción entre 4 a 7 años (Vinueza, 2012b).

A pesar de su baja densidad, la balsa posee excelentes propiedades mecánicas, entre las cuales constan (i) módulo de elasticidad alto que se encuentra en un rango de 938.3 a 2910.7 MPa, (ii) módulo de ruptura que varía de 6.6 a 26.3 MPa, (iii) resistencia a la compresión paralela a la fibra que varía de 3.8 a 19.3 MPa, y (iv) resistencia a la compresión perpendicular a la fibra que varía en el rango de 0.2 a 0.96 MPa.

Una de las principales lecciones que debe aprenderse de la biomecánica es que, entre otros aspectos, examina los efectos mecánicos de fuerzas internas y externas actuando sobre cualquier tipo de biomaterial, incluyendo seres humanos, animales y/o plantas (Niklas, 1992).

Las leyes físicas afectan a todos los organismos, pero las consecuencias de estas leyes se difieren según el hábitat. La variación de valores de sus características depende de muchos factores entre ellos está la edad de la madera, las condiciones climáticas, topografía y suelo del lugar de procedencia (Niklas, 1992). La presente combinación de propiedades, hace que esta especie de madera sea un material inigualable, al momento de ser utilizada como núcleo de una estructura tipo sándwich (Moncayo Galárraga, 2017).

El núcleo rígido a base de balsa (Baltek rígido ®), originaria de la provincia de Los Ríos-Ecuador, ciudad de Quevedo, que será utilizado como núcleo en el tablero estructural tipo sándwich del presente estudio, será proporcionado por la empresa 3A Composites, cuyas propiedades físico-mecánicas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Propiedades físico-mecánicas de BALTEK ®. Tomado de PLANTABAL® (2016)

Propiedades de BALTEK ® (SB100)	Norma	Unidades	Valor
Apparent nominal density	ASTM C-271	kg/m ³	148,0
Compressive strength perpendicular to the plane	ISO 844	MPa	9,2
Compressive modulus perpendicular to the plane	ISO 844	MPa	2526,0
Tensile modulus perpendicular to the plane	ASTM C-297	MPa	2791,0
Shear strength	ASTM C-273	MPa	2,6
Shear modulus	ASTM C-273	MPa	187,0

Fuente: (PLANTABAL®, 2016)

2.2.5. Ligantes

Otro factor importante en las estructuras tipo sándwich es el adhesivo o ligante que se usa para unir los paneles exteriores con el núcleo, y las propiedades mecánicas de los tableros dependen de la calidad de las conexiones entre las partículas de madera, lo que es determinado por la cantidad y el tipo de adhesivo (Zanuncio et al., 2015).

Para la fabricación de los tableros estructurales tipo sándwich, en el proceso de manufactura es necesario añadir cierto tipo de elemento ligante. La adhesión entre las fibras de la madera y el adhesivo, depende de la interacción físico-química entre elementos. Durante el proceso de ligación entre elementos en un material compuesto, los adhesivos deben (i) humedecer las fibras, (ii) fluir de modo controlado durante el prensado, y (iii) adquirir forma sólida. Si se producen fallos en algunos de estos pasos, la calidad de los tableros estructurales tipo sándwich se verá afectada. Una buena conexión requiere un contacto íntimo entre el adhesivo y la fibra. Esto se realiza usando presión y temperatura, ajustando también la viscosidad del adhesivo, transfiriendo el flujo a través de los puntos de conexión, mientras se acomoda la madera para conseguir mejor contacto en la superficie (C.I. Campos, 2004).

Para combinar los paneles externos con el núcleo de las estructuras tipo sándwich se usará como adhesivo, para efectos del presente estudio, poliuretano conocido también como adhesivo rígido, mismo que posee alta resistencia a la fatiga y alta resistencia a la fractura (hasta 25 Mpa). Este tipo de adhesivo tiene un curado mediante la aportación de calor, necesita temperaturas sobre los 100 °C para que exista la correcta reacción

química de isocianato (grupo químico con la formula $N=C=O$) necesario para la formación del poliuretano (Dias, 2017).

2.3. Hipótesis

Los tableros estructurales tipo sándwich compuestos de melina y balsa cumplen de manera óptima con requisitos constructivos y medio ambientales que les permiten ser utilizados en zonas de alto riesgo sísmico debido a su excelente comportamiento mecánico – estructural.

2.4. Variables

2.4.1. Variables independientes

- Biomaterial 1: melina laminada
- Biomaterial 2: balsa
 - Panel tipo rígido realizado de madera de balsa (BALTEK ®)
- Normas que rigen el comportamiento de biomateriales

2.4.2. Variable dependiente

- Comportamiento mecánico – estructural de los tableros propuestos.

2.5. Normativa relacionada

ASTM C364 / C364M - 16

Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions

Este método de prueba proporciona un método estándar para obtener resistencias de compresión de paneles exteriores en sándwich para las propiedades de diseño del tablero, las especificaciones del material, las aplicaciones de investigación y desarrollo y la garantía de calidad.

Este método de prueba cubre las propiedades de compresión de la construcción de sándwich estructural en una dirección paralela al plano del sándwich. Las formas de material del núcleo permitidas incluyen aquellas con superficies de unión continua (como la madera de balsa y las espumas), así como aquellas con superficies de unión discontinua (como el panal).

ASTM C297 / C297M - 16

Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions

En un tablero estructural tipo sándwich, la integridad de la unión entre el núcleo y el revestimiento es necesaria para mantener la estabilidad del revestimiento y permitir la transferencia de carga entre los revestimientos y el núcleo. Este método de prueba se puede utilizar para proporcionar información sobre la fortaleza y calidad de los enlaces de núcleo a contacto con los paneles exteriores. También se puede usar para producir datos de resistencia a la tracción plana para el material del núcleo. Si bien se usa principalmente como una prueba de control de calidad para tableros estructurales tipo

sándwich adheridos, también se puede usar para producir datos de resistencia a la tracción plana para propiedades de diseño estructural, especificaciones de materiales y aplicaciones de investigación y desarrollo.

Este método de prueba determina la resistencia a la tracción plana del núcleo, la unión entre el núcleo y la cara o el revestimiento de un tablero sándwich ensamblado. Las formas de material del núcleo permitidas incluyen aquellas con superficies de unión continua (como la madera de balsa y las espumas), así como aquellas con superficies de unión discontinua (como el panal).

ASTM C393 / C393M - 16

Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure

Se pueden realizar pruebas de flexión en la construcción de sándwich plano para determinar la rigidez a la flexión del sándwich, la resistencia al cizallamiento del núcleo y el módulo de cizalladura. Las pruebas para evaluar la resistencia al corte del núcleo también se pueden usar para evaluar los enlaces de núcleo con los revestimientos.

Este método de prueba se puede utilizar para producir resistencia al corte del núcleo y datos de resistencia al cortante desde el núcleo hasta la cara, para un diseño estructural admisible, las especificaciones de la materia y las aplicaciones de investigación y desarrollo; también se puede usar como una prueba de control de calidad para tableros tipo sándwich adheridos.

Este método de prueba cubre la determinación de las propiedades de cizallamiento del núcleo de construcciones tipo sándwich planas sometidas a flexión de tal manera que los momentos aplicados producen la curvatura en los revestimientos del sándwich. Las

formas de material del núcleo permitidas incluyen aquellas con superficies de unión continua (como la madera de balsa y las espumas), así como aquellas con superficies de unión discontinua (como el panal).

ASTM C273

Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials

Las propiedades de cizallamiento del núcleo son propiedades fundamentales que se utilizan en el diseño de tableros estructurales tipo sándwich. Este método de prueba proporciona información sobre el comportamiento de desviación de fuerza de las construcciones o núcleos de sándwich cuando se cargan en cizalladura paralelos al plano de los revestimientos. A partir de una curva de fuerza-deflexión completa, es posible calcular la tensión de cizalladura del núcleo a cualquier fuerza (como la tensión de cizallamiento en el límite proporcional, el rendimiento o la fuerza máxima) y calcular un módulo de cizalladura del núcleo efectivo.

Los factores que influyen en la resistencia al corte del núcleo y por lo tanto deben informarse son los siguientes: material de revestimiento, material del núcleo, material adhesivo, métodos de fabricación del material, geometría del núcleo (densidad, tamaño de celda, orientación, etc.), espesor del adhesivo, geometría de la muestra y precisión de medición asociada, preparación de muestras, acondicionamiento de muestras, entorno de prueba, alineamiento de muestras, procedimiento de carga, velocidad de prueba y contenido de vacío de adhesivo.

CAPITULO III

3. ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS

El paso previo al desarrollo experimental de ensayos de laboratorio, es la elaboración de prototipos, pero esta no se puede llevar a cabo sin antes comprobar la factibilidad de los componentes del prototipo estructural tipo sándwich. Por tal razón es imperante conocer cuál es la disponibilidad de cada material que tiene el país, así como conocer las propiedades físicas y mecánicas de los mismos.

3.1. Estudio de factibilidad de materiales para la elaboración de tableros estructurales tipo sándwich.

El estudio de factibilidad para la elaboración de los prototipos se basará en dos aspectos: (i) disponibilidad del recurso en el Ecuador y (ii) propiedades físicas y mecánicas de cada especie.

3.1.1. Balsa (*Ochroma pyramidale*)

3.1.1.1. Disponibilidad de balsa (*Ochroma pyramidale*) en Ecuador.

Una de las especies madereras y forestales más atractivas para los consumidores del mercado internacional es la balsa (*Ochroma pyramidale*), la cual se la cultiva por reforestación o de forma natural en la región subtropical del Ecuador. La balsa sigue un proceso de cultivo, reforestación y transformación con el propósito de darle un valor agregado, con el cual pueda liderar el mercado a nivel mundial y así influir directamente en la economía del Ecuador por ser uno de los recursos maderables de mayor lucro (Osorio et al., 2010).

El cultivo de balsa (*Ochroma pyramidale*) en el continente americano se extiende de norte a sur desde México hasta Bolivia, hacia el este pasa por Venezuela y a través de las Antillas (véase Figura 15) (Francis, 1991).

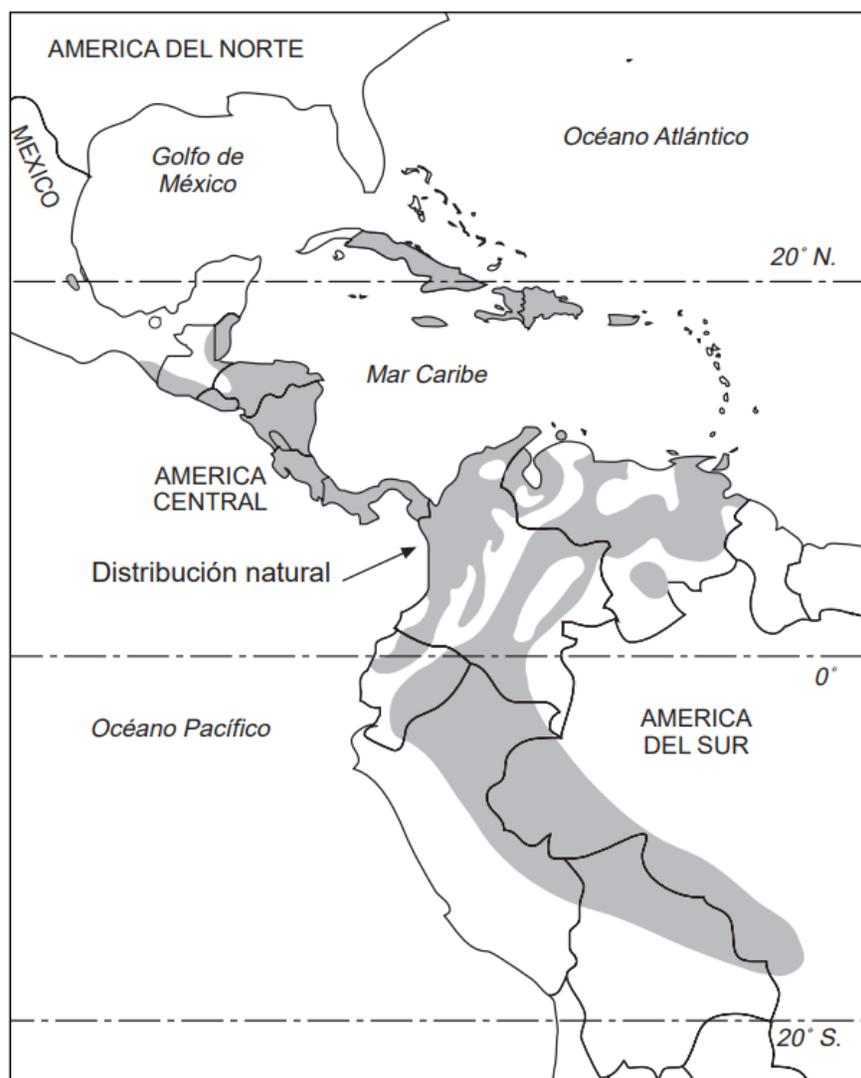


Figura 15 Distribución natural de balsa (*Ochroma pyramidale*) en América
Fuente: (Francis, 1991)

Desde 1943 Ecuador ha dominado el mercado de balsa, siendo en ese año productor del 95% de madera de balsa a nivel mundial (Fletcher, 1951). Midgley et al. (2010) reporta que en 2008 Ecuador cubrió cerca del 89% de la demanda mundial de balsa, y esto no ha dejado de ser algo frecuente, pese a la gran competencia de países vecinos como Perú y Brasil. Es así que en 2015 alrededor del 78 % de la demanda mundial la satisfizo Ecuador (Salazar Valverde, 2018).

Ecuador, al disponer de una variedad de zonas climáticas, es idóneo para el aprovechamiento forestal, la mayoría de estas se encuentran en la parte noroeste y la Región Amazónica del país. Las provincias con mayor producción de madera son: Pichincha, El Oro, Guayas y Los Ríos. Actualmente existen 27 millones de hectáreas de las cuales el 41 % se encuentra protegido como bosques nativos; dentro de estos, solo una pequeña parte (correspondiente al 6%) son clasificados como bosques productores (Loayza Añasco, 2017; Mendoza Cuadros, 2013).

Según el Ministerio del Ambiente entre 1959 – 2013 se registró 8951,26 hectáreas de balsa, no obstante, en el año 2013 se creó el programa de incentivos para la forestación y reforestación con fines comerciales, para acrecentar el desarrollo ambiental comercial. En este plan se incluyó a la balsa y su meta para ese año, fue de 20000 ha, el cual no se cumplió sin embargo se llegó a una cifra aproximada, ya que se lograron inscribir 19300 ha y de estas se sembraron 16000 ha, teniendo así un total de 16'000000 de árboles de balsa, pues se multiplica por 1000 que es el promedio de árboles por hectárea. Los siguientes años la Subsecretaria de Producción Forestal tuvo previsto un crecimiento del 5% anual (Parra, 2015).

Cabe recalcar que la balsa tiene un crecimiento rápido que oscila entre 4 y 6 años hasta llegar a su madurez, en vista de toda la información precedente se llega a la resolución de que se puede satisfacer la demanda creada para elaborar tableros estructurales tipo sándwich a gran escala ya que el consumo nacional es de apenas 10% por ciento, mientras que el 90% se exporta a la Comunidad Económica Europea y Estados Unidos en forma de madera aserrada, bloques, láminas y tableros (Obregón, 2005; Osorio et al., 2010).

3.1.1.2. Propiedades físicas y mecánicas de balsa (*Ochroma pyramidale*)

En la siguiente sección se presentan propiedades físicas y mecánicas referentes a fuentes bibliográficas sobre trabajos realizados con balsa, dentro de las propiedades físicas tenemos; (i) densidad seca y (ii) contenido de humedad, de la misma forma se presentan propiedades mecánicas como; (i) módulo de elasticidad (MOE), (ii) módulo de corte (G), también se presenta (iii) módulo de ruptura (MOR); determinados mediante ensayos de compresión y flexión.

3.1.1.2.1. Propiedades físicas

La madera abarca una extensa variedad de usos y es utilizada para elaborar distintos productos. Esa variedad es el resultado de un espectro de propiedades físicas en las especies de madera, estas dependen de muchos factores tales como: edad, especie de árbol, tipo terreno y clima (Glass & Zelinka, 2010).

La madera intercambia humedad con el aire; la cantidad y dirección del intercambio (ganancia o pérdida) dependen de la humedad relativa del lugar, la temperatura del aire y la cantidad de agua en la madera. Esto a su vez influye en todas las propiedades de la madera de forma significativa (Laboratory & Agriculture, 2007). Esta sección analiza las propiedades físicas de mayor interés al momento de utilizar la balsa como un material en la elaboración de tableros estructurales tipo sándwich.

3.1.1.2.1.1. Densidad seca

La densidad seca es la relación entre el peso de la madera en estado seco y su volumen seco (peso seco/ volumen seco), es de particular importancia en la madera de balsa, ya que su variación es alta pues oscila entre 40 y 340 kg/m³, además junto a la dirección de la fibra, tienen un marcado efecto en todas las propiedades mecánicas (Newaz et al., 2016; Soden & McLeish, 1976). La Tabla 3 presenta datos de densidad seca de madera de balsa.

Como se muestra en la Tabla 3 existe cierto rango de semejanza en los valores de densidad seca presentados por diferentes autores, el cual va desde 90.99 hasta 180 kg/m³, al comparar con valores de densidad presentados por Larrua Quevedo y Pignatta Silva (2013) en la cual la densidad del acero es de 7850 kg/m³ y la del hormigón se encuentra entre 2300 – 2400 kg/m³, se desprende que la densidad seca de la balsa es menor entre 55 y 16 veces, respectivamente, razón que nos lleva a repensar el uso de materiales no-convencionales en la industria de la construcción, utilizando su alta eficiencia mecánica, disminuyendo el peso de las viviendas y siendo amigable con el medio ambiente.

3.1.1.2.1.2. Contenido de Humedad

La madera es un biomaterial que proviene de los árboles, los cuales contienen agua en su interior. Al momento de secar la madera, se pierde un alto porcentaje de agua, pero no la totalidad, ya que al ser un material “higroscópico” (material que cede o gana humedad hasta nivelarse con la humedad relativa del aire que lo rodea), siempre tiene una cantidad de agua en su interior, la cual toma el nombre de contenido de humedad (CH), que por definición es la relación entre el peso del agua y el peso seco de la madera.

Según el porcentaje de contenido de humedad se puede hacer una corta clasificación a la madera: (i) madera verde (30 % - 150%), (ii) madera húmeda (20%-30%), (iii) madera seca al aire (13%-18%), (iv) madera seca en cámara (<12%) (Tamarit-Urias & Fuentes-Salinas, 2003). Este rasgo de la madera tiene alto impacto sobre las características mecánicas de la misma. Según Cruz de León (2011) el contenido de humedad en la madera debe variar entre 10% y 15% para que no sufra deterioro por agentes bióticos.

3.1.1.2.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera y sus derivados se definen como aquellas características que delimitan su capacidad y aptitud para soportar solicitaciones (esfuerzos) externas (Spavento et al., 2008). Estas propiedades están gobernadas por la orientación de las fibras que poseen las distintas especies de maderas, por lo que, para definir las y analizarlas se debe distinguir la dirección de aplicación de la fuerza ya sea perpendicular o paralela.

Dentro de las propiedades mecánicas, también llamadas reológicas, se debe conocer sus principales magnitudes como: (i) deformación unitaria: cambio de forma o tamaño de un cuerpo relacionado a su tamaño original, (ii) tensión: magnitud física que representa la fuerza por unidad de área en el punto de un cuerpo, (iii) resistencia: tensión máxima que es capaz de resistir un material, estas pueden ser tensión a compresión, tensión de tracción o de esfuerzo de corte (Barreiro Elorza & Ruiz-Altisent, 1996).

La resistencia a tracción, compresión o corte se calcula obteniendo la carga máxima de los prototipos al llevarlos a la rotura y también determinando el área de la sección en la que se aplicó la fuerza, (iv) límite elástico: es el esfuerzo máximo que un material puede resistir sin presentar deformación unitaria al momento de suspender la aplicación de la fuerza, (v) módulo de elasticidad: es la relación esfuerzo/deformación unitaria que se presenta en un material al cual se le está aplicando fuerza, esta es constante mientras no se exceda el límite elástico, y (vi) punto de rotura: es el punto de la curva esfuerzo vs deformación unitaria para el cual se produce rotura en la macroestructura de la muestra (Barreiro Elorza & Ruiz-Altisent, 1996).

Una vez que se han definido estos términos se presenta los valores de propiedades mecánicas obtenidos para madera de balsa (*Ochroma pyramidale*) de fuentes bibliográficas, estas se resumieron en la Tabla 3 que se muestra a continuación.

Tabla 3*Propiedades físicas y mecánicas balsa (Ochroma pyramidale)*

Autor	Año	Origen	Densidad	Flexión		Compresión paralela		Corte
			seca	MOR	MOE	MOR	MOE	G
			kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Newaz et al	2014	USA	91,0	10,1	1683,2	8,1	3715,2	110,2
Doyle y Drow	1962	USA	135,0		3792,1	15,5		150,0
Grenestedt y Bekisli	2003	USA	155,0		3980,0			160,0
J.M. Dinwoodie	1975	Inglaterra	180,0	23,0	6274,0	15,5	3200,0	200,0
Wood Handbook	2010	USA	160,0		4000,0			
CIRAD	2012	Francia	140,0	24,0	5140,0	11,0		
Ministerio del Ambiente (MAE)	2014	Ecuador	180,0	20,9	4285,5	13,1	5266,2	
Moncayo Galarraga	2017	Ecuador	184,6	21,6	2507,3	15,5		

Fuente: (CIRAD 2012; Da Silva & Kyriakides, 2007; Dinwoodie, 1975; Doyle et al., 1962; Grenestedt & Bekisli, 2003; MAE, 2014; Moncayo Galárraga, 2017; Newaz et al., 2016; Ross, 2010)

Según se aprecia en la Tabla 3 se puede ver que no hay una relación directa entre los valores presentados por cada autor, esto se debe a que las muestras de balsa fueron tomadas en distintas regiones, pero a su vez existen dos autores que trabajaron con la especie originaria de Ecuador estos son Moncayo Galárraga (2017) y MAE (2014).

En relación a los dos autores ecuatorianos se puede apreciar una aproximación entre sus valores de densidad seca, de igual manera sucede para su módulo de ruptura (MOR) a flexión y a compresión paralela a la fibra. Existe también una marcada diferencia entre sus módulos de elasticidad (MOE), pero esto puede ser producto de que las muestras fueron tomadas de árboles de balsa de diferentes edades, ya que no se presentan las edades en sus investigaciones.

3.1.2. Melina (*Gmelina arborea*)

3.1.2.1. Disponibilidad de melina (*Gmelina arborea*) en Ecuador.

Según Dvorak (2004) la melina (*Gmelina arborea*) es procedente de 11 países en regiones tropicales y subtropicales del continente asiático, como se muestra en la Figura 16. Hasta el 2004 habían sido instituidas 700000 ha. de melina en plantaciones o sitios forestales del oeste central, el este del continente africano, el sureste de Asia, el norte de América Latina y el Pacífico Sur. Esta variedad de madera ha generado alto interés en el mercado internacional debido a su característica de rápido crecimiento y un retorno de inversión acelerado.

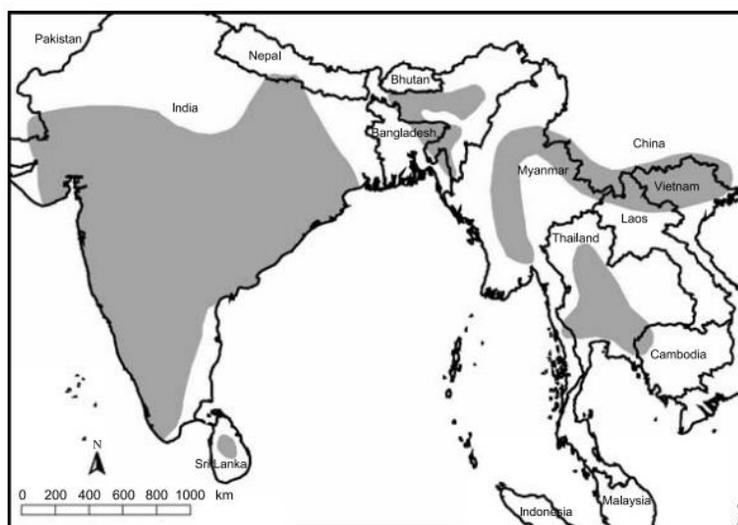


Figura 16 Lugares originarios de melina (*Gmelina arborea*)
Fuente:(Dvorak, 2004)

Dvorak (2004) asume que el total de 700000 ha de melina se encuentran divididas aproximadamente de la siguiente manera: 11 % en América Latina, 36 % en África y el 53% en India, sudeste asiático y la región del Pacífico Sur.

Por su parte Ecuador al ser un país de gran diversidad climática, ha llevado a cabo grandes procesos de desarrollo de cultivos forestales, este a su vez ha mejorado su comportamiento debido a que en algunas zonas existen hasta 12 horas de luz solar al día. Se ha puesto gran interés en producir maderas demandadas por el mercado internacional, una de estas es la melina (*Gmelina arborea*) debido a que es un árbol de rápido crecimiento que se adapta a una amplia gama de tipos de suelos y que se utiliza en gran cantidad para aligerar construcciones y para el tableros de partículas de madera (Vozzo, 2010). Las provincias con mejores condiciones para el desarrollo de esta especie son Santo Domingo de los Tsachilas y los Ríos (Morán Plaza & Nieto Alava, 2015).

3.1.2.2. Propiedades físicas y mecánicas de melina (*Gmelina arborea*) en Ecuador.

Esta sección abarca las propiedades físicas y mecánicas de la melina, tomadas de fuentes bibliográficas y estudios en los que se trabajó con este material, las propiedades físicas y mecánicas que se estudiarán son las que se nombraron en la Sección 3.1.1.2

3.1.2.2.1. Propiedades físicas

3.1.2.2.1.1. Densidad seca

Dentro de las propiedades físicas de las maderas, una de las más importantes es la densidad seca, ya que esta característica gobierna el comportamiento mecánico de la misma, en la Tabla 4 se muestra un registro de valores de densidad seca de melina de distintos estudios.

La Tabla 4 muestra un rango de valores de densidad seca de melina entre 300 y 550 kg/m³ en comparación con los valores presentados en la Tabla 2 se puede decir que la densidad seca de melina es hasta tres veces mayor que la densidad seca de la balsa. Basándose en los valores de densidad de acero y hormigón presentados por Larrua Quevedo y Pignatta Silva (2013), se puede apreciar que la densidad seca de melina es menor entre 19 y 6 veces, respectivamente, todo esto para demostrar que si se realizan construcciones con materiales no convencionales como los presentados, reducirían considerablemente el peso de las estructuras y disminuirían costos de construcciones por cimentaciones.

3.1.2.2.1.2. Contenido de Humedad

Esta es una propiedad física muy importante en todas las maderas, su definición y rangos se presentan en la Sección 3.1.1.2.1.2. En la Tabla 4 se presenta un compendio de valores de contenido de humedad de melina.

La Tabla 4 muestra que la mayoría de los valores de contenido de humedad se aproximan al 12%, lo cual indica que en estas investigaciones se trabajó con muestras secadas al horno. Todos los valores de contenido de humedad de la Tabla 4 cumplen lo descrito por Cruz de León (2011) cuya sugerencia dice que el contenido de humedad debe situarse entre (10% - 15%), para evitar deterioro por agentes bióticos (hongos xilófagos, hongos cromógenos u hongos de pudrición).

3.1.2.2.2. Propiedades mecánicas

Para tener un conocimiento amplio sobre los materiales a ser utilizados para elaborar tableros estructurales tipo sándwich, se presenta la Tabla 4, la cual muestra un resumen sobre las propiedades mecánicas de melina, la recopilación de datos pudo encontrar valores de pruebas mecánicas como flexión, compresión y corte. Estas características de la madera dependen en gran manera de la dirección de las fibras, su densidad seca y su contenido de humedad.

Una de estas propiedades es el módulo de elasticidad (MOE), el cual se presenta cuando una pieza de madera es sometida a compresión. La fuerza aplicada se denomina carga (stress) y el esfuerzo de respuesta del material se denomina como deformación (strain). La relación entre carga y deformación se denomina módulo de elasticidad, esta es la definición de la ley de elasticidad de Hooke la cual nos dice que la deformación unitaria que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo (Popov et al., 1982). Otra propiedad mecánica indispensable es el módulo de ruptura (MOR), ya que refleja la máxima capacidad de carga de un miembro y es proporcional al momento máximo soportado por la muestra (Bahtiar, Nugroho et al. 2010).

Tabla 4*Propiedades físicas y mecánicas de melina (Gmelina arborea)*

Autor	Año	Origen	Densidad seca kg/m ³	Flexión		Compresión paralela	Corte
				MOR MPa	MOE MPa	MOR MPa	G MPa
Pearson et al	1932	India	300,0	59,6	5515,8	33,8	11,9
Lee	1964	Malasia	300,0		9604,4	32,6	8,2
Dawkins	1919	Myanmar	310,0		8618,5	22,8	
Thomas AV	1939	Malasia	310,0		7377,4	22,3	
Lamb AFA	1968	Nigeria	310,0	70,3	7584,2	37,0	11,0
Gonzalez	2003	Costa Rica	390,0	51,0	6950,0	29,8	6,9
Chudnoff	2007	Malasia	410,0	64,6	8894,0	33,8	
Mendez Mejias	2016	Costa rica	447,3		7980,0		
Karlinasari et al	2008	India	550,0	49,6	9340,0		

Fuente: (Chudnoff, 2007; Dawkins, 1919; González & Moya, 2003; Karlinasari et al., 2008; Lamb, 1968; Lee, 1964; Méndez-Mejías, 2016; Pearson & Brown, 1932; Thomas, 1939)

La Tabla 4 indica valores de módulo de ruptura (MOR) a flexión y a compresión paralela a la fibra, también módulo de elasticidad (MOE) a flexión y por último la fuerza cortante a la que falla esta especie. Como podemos apreciar existen amplios rangos en cada valor lo cual es algo esperado ya que la madera incluso al ser de la misma especie, depende mucho del lugar en el que crece, sus condiciones climáticas y el tipo de cuidado que se le dé. La Tabla 4 presenta una recopilación de datos sobre melina (*Gmelina arborea*) de diferentes autores y distintas partes del mundo; esta tiene la finalidad de dar un vistazo breve sobre cuáles son las capacidades mecánicas de esta especie maderera y cuáles son sus variaciones dependiendo de en qué lugar se la cultive.

3.2. Estudio de factibilidad de ligantes a usar

Para la elaboración de un material compuesto como lo es un tablero estructural tipo sándwich, se tiene que determinar cuáles serán los ligantes de sus elementos. Las

propiedades mecánicas de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich dependen de la calidad de las conexiones entre las partículas de madera, lo que es determinado por la cantidad y el tipo de adhesivo (Zanuncio, Mendes, Mendes, Pires, & Carvalho, 2015).

El adhesivo debe garantizar que el material compuesto trabaje como un solo elemento y esto se consigue eligiendo de manera adecuada los elementos que unirán sus partes. La adhesión entre las fibras de la madera y el adhesivo, depende de la interacción físico-química entre elementos.

Durante el proceso de unión entre elementos en un material compuesto, los adhesivos deben; (i) humedecer las fibras, (ii) fluir de modo controlado durante el prensado, y (iii) adquirir forma sólida. Si se producen fallos en algunos de estos pasos, la calidad de los tableros estructurales tipo sándwich se verá afectada. Una buena conexión requiere un contacto íntimo entre el adhesivo y la fibra. Esto se realiza usando presión y temperatura, ajustando también la viscosidad del adhesivo, transfiriendo el flujo a través de los puntos de conexión, mientras se acomoda la madera para conseguir mejor contacto en la superficie (C.I. Campos, 2004).

Para el caso de la presente investigación se utilizaron dos tipos de ligantes; (1) urea – formaldehído y (2) poliuretano.

3.2.1. Urea formaldehído (UF)

La urea formaldehído es un polímero termoestable, estos se caracterizan por poseer una estructura molecular entrelazada, este tipo de polímero no puede ser modificado una vez que haya sido procesado y tiende a producir una estructura reticulada cuando se le aplica calor y presión (Enriquez & Stalin, 2007).

Los polímeros termoestables tales como la urea formaldehído, se fabrican a base de precursores líquidos o semisólidos, que se solidifican de manera irreversible, a esto se le llama policondensación, polimerización o curado, al final de este proceso la resina en estado líquido se transforma en un sólido rígido con eslabones químicos en cruz, lo cual produce una red en tres dimensiones de cadenas de polímero. Las características de la estructura del polímero influirán en las propiedades mecánicas del material, todas estas cualidades del adhesivo dependen de la cantidad de químico utilizado y la temperatura de curado (Miravete & Castejón, 2002).

Las resinas urea formaldehído se utilizan principalmente como adhesivos para el encolado de madera contrachapada, tableros de partículas (OSB) y otros productos de madera estructurada (Vallejos Calzada, 2010).

En base a la información previamente presentada, se puede considerar que la urea formaldehído es un adhesivo ampliamente usado en la industria maderera debido a su gran capacidad de adhesión. Por lo tanto, este polímero es el que se utilizó para unir chapas de melina en dos direcciones, como se describe en la Sección 3.4.

3.2.2. Poliuretano

Para combinar los paneles externos con el panel de núcleo de balsa de las estructuras tipo sándwich se usará como adhesivo, poliuretano conocido también como adhesivo rígido, mismo que posee alta resistencia a la fatiga y alta resistencia a la fractura (hasta 25 Mpa).

El poliuretano es un polímero que se alcanza mediante la condensación de polyol combinado con isocianato, estas dos sustancias son líquidas a temperatura ambiente. Después de reaccionar estas dos sustancias forman enlaces consiguiendo un material sólido, uniforme y con alta resistencia. El poliuretano se caracteriza por su baja densidad y alta adhesión (Quilumba et al., 2017).

En la última década se ha presentado gran interés por este polímero debido su sobresaliente adhesividad, resistencia, elasticidad y no toxicidad. Las principales aplicaciones para esta clase de polímeros son la elaboración de espumas, revestimientos rígidos y flexibles en estructuras, adhesivos y elastómeros sintéticos. (Valdés et al., 2008).

Este tipo de adhesivo tiene un curado mediante la aportación de calor, necesita temperaturas sobre los 100 °C para que exista la correcta reacción química de isocianato (grupo químico con la formula $N=C=O$) necesario para la formación del poliuretano (Dias, 2017). Este ligante se utilizó para unir los CLT de melina con el núcleo sólido de balsa como se describe en la Sección 3.6.

3.3. Adquisición de materiales

El primer paso para la elaboración de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich, es la adquisición de materiales, los cuales son madera de melina y madera de balsa. Cabe recalcar que todos los materiales fueron proporcionados por la empresa 3A Composites mediante dos de sus subempresas (Plantabal© y Banova©).

Los materiales provienen de la provincia de los Ríos, cantón Valencia, parroquia el Vergel. El primer paso es seleccionar y marcar los arboles a ser cortados, estos deben cumplir ciertos requisitos tales como edad, buen estado fitosanitario, rectitud del fuste y escasos nudos visibles.

Una vez que el tronco ha sido cortado, se realizan trozas de 1.20 m aproximadamente. Para que no exista una alta deshidratación del tronco se aplica una emulsión de parafina en los extremos cortados, esto evita que exista agrietamiento en la madera.

Hasta este punto el procedimiento para los dos elementos del tablero estructural tipo sandwich es el mismo, pero es en esta etapa que se bifurcan, ya que para el núcleo sólido de balsa se debe realizar cortes de la troza para obtener listones de madera, mientras que para la melina el proceso es diferente ya que las trozas son transportadas a la empresa BANOVA, en este lugar se utilizarán para realizar paneles externos (chapas) de madera de melina.

3.4. Elaboración de paneles externos (CLT) de madera de melina

Los elementos externos del tablero estructural tipo sándwich es Cross Laminated Timber (CLT) hecho a base melina (*Gmelina arborea*). La empresa que lleva a cabo el procedimiento para modificar la madera de melina hasta convertirla en CLT, es Banova. El procedimiento que llevan a cabo se lo especifica a continuación:

(1) Las trozas de madera de melina se dejan secar al aire durante siete días desde su llegada a la empresa, en esta locación se las humedece por lapsos para que el calor no ocasione grietas en las trozas (véase Figura 17).



Figura 17 Trozas de melina apiladas para su humectación.

(2) Las trozas son seleccionadas y transportadas con la ayuda de una garra hacia una descortezadora (TIPO MOD 1), la cual extrae la corteza de las trozas y deja liso el exterior (véase Figura 18).



Figura 18 Transporte de trozas de melina.

(3) Inmediatamente las trozas descortezadas son enviadas hacia un torno para desenrollado y realizar cortes de chapas en troncos de 4 pies de longitud (véase Figura 19). Aquí se pueden realizar chapas de hasta 2.5 mm de espesor. Las chapas de melina se extrajeron mediante el torno a una velocidad de 100 m/min para un espesor de 2.45 mm (véase Figura 20). En esta parte se realiza un control de calidad sobre cada chapa para que no exista discontinuidades en su estructura, el producto que se encuentra en óptimas condiciones se selecciona para seguir con el proceso y el material deficiente se elimina.



Figura 19 Torno con troza de melina



Figura 20 Producto final del tornado (chapas de melina)

(4) El siguiente paso es el secado de las chapas que se realiza a una temperatura de 175 ± 5 °C y una presión de 10.1 bar. Esto se lleva a cabo mediante una banda transportadora que moviliza la chapa de melina a lo largo de tres hornos con distintas

temperaturas establecidas, a una velocidad de 1.7 m/min, para al final obtener una humedad óptima de 12% (véase Figura 21 y 22).



Figura 21 Chapas de melina al 12% de humedad



Figura 22 Configuración de equipo de secado

Las chapas de melina secas son clasificadas por su calidad mediante un proceso automatizado propio de la empresa. Este se centra en parámetros como densidad, contenido de humedad e imperfecciones en su estructura.

(5) Las chapas seleccionadas son encoladas alternadamente con urea formaldehído, a través de un rodillo encolador, estas se colocan una encima de otra para formar el CLT de melina (véase Figura 23).



Figura 23 Distribución de chapas de melina para conformar un CLT

(6) Se coloca el CLT dentro de la prensa multiplato que aplica una presión de 400 psi a una temperatura de 100°C, durante 10 minutos, para comprobar la temperatura de la prensa se utiliza un termómetro digital de láser, posteriormente se retira el producto y se apila para su siguiente proceso (véase Figura 24).



Figura 24 Extracción de CLT de melina y apilado

(7) Por último el CLT de melina pasa por un proceso de encuadre para que tome las dimensiones comerciales de 1.22 m x 2.44 m (véase Figura 25).



Figura 25 Encuadre de CLT de melina

Si al final del proceso se presentan fallas mínimas en el producto, están son subsanadas con espuma de poliuretano y así obtener un producto listo para su comercialización.

3.5. Elaboración de núcleo de madera de balsa

El elemento núcleo del tablero estructural tipo sándwich es a base de balsa (*Ochroma pyramidale*). La empresa que lleva a cabo el proceso de construcción del núcleo, conocido con el nombre comercial de Baltek®, es Plantabal©. El procedimiento que llevan a cabo se lo especifica a continuación:

(1) Se extrae las trozas de madera de balsa de plantaciones propias de Plantabal®, las cuales realizan un ciclo de cosecha cada 4 años, posteriormente se cortan las trozas de madera hasta obtener una sección transversal cuadrada, las cuales están disponibles para su proceso en un periodo máximo de 10 días posterior a su tala (véase Figura 26).



(a)



(b)

Figura 26 Balsa (*Ochroma pyramidale*) en (a) estado natural, (b) trozas listas para su transporte.

(2) Las trozas son seleccionadas y transportadas con el objetivo de armar pacas de acuerdo a su espesor, las cuales se las seca en horno entre 30 y 50 °C, para llegar a una humedad, entre 8 y 12% (comprobada con higrómetro).

(3) Las trozas de balsa pasan por una línea de transferencia, en la que se identifica el tamaño de las mismas para después cepillarlas, creando listones con el propósito de limpiar su superficie, inmediatamente se las clasifica en función de sus dimensiones y se procede a imprimir en cada troza su diámetro y su densidad.

(4) Se juntan los listones en función de su largo y densidad, para impregnar todas las superficies de los listones con Acetato de polivinilo (PVA 302520), apilándolos en bloques parejos para ingresarlos en una prensa hidráulica con una presión entre 1200 y 1500 psi, por un tiempo de 90 minutos.

(5) Por último, se ingresan 6 bloques de tiras de balsa con las mismas dimensiones en la maquina cortadora, donde se realiza el corte a todos los bloques, obteniendo paneles con el mismo espesor.

(6) Para verificar el estado del Baltek®, se realiza un control de calidad manual donde se marca las fallas y se realiza una corrección del error mediante el remplazo de sección dañada.

(7) Se codifica cada tablero Baltek® de acuerdo sus características, para su futura distribución.

3.6. Unión de pieles y núcleo con ligante

El último paso en la elaboración de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich, es la unión de los paneles externos de melina (*Gmelina arborea*) con el panel de núcleo de balsa (*Ochroma pyramidale*). El procedimiento se lo especifica a continuación:

(1) Los paneles externos de melina de (2.40 m x 1.20 m) son cortados a la medida de los paneles de núcleo de balsa (1.20 m x 0.60 m) (véase Figura 27).



(a)



(b)

Figura 27 (a) Proceso de corte de paneles externos de melina, (b) encuadre de paneles de núcleo de balsa con paneles externos de melina

(2) Se coloca una película de poliuretano sobre el tablero de melina (150 g/m²) con un 8% de agua para activar la reacción química (véase Figura 28).



Figura 28 Colocación de poliuretano en panel externo inferior de melina

(3) Se coloca el panel de núcleo de balsa sobre el panel inferior de melina y se procede a colocar otra película de poliuretano (véase Figura 29).



(a)



(b)

Figura 29 Proceso de ensamblaje del prototipo de tablero estructural tipo sándwich (a) panel de núcleo de balsa sobre panel exterior de melina (b) poliuretano colocado sobre panel de núcleo de balsa

(4) Se coloca el panel exterior superior de melina alineando todas las partes del prototipo de tablero estructural tipo sándwich (véase Figura 30).



Figura 30 Superposición de panel exterior superior de melina

(5) Los prototipos de tableros se transportan por una línea de distribución hacia la prensa monoplato (véase Figura 31).



Figura 31 Transporte de prototipos de tableros tipo sándwich a la prensa monoplato

(6) Los tableros se prensan a 234 bar. de presión durante 35 minutos (véase Figura 32).



Figura 32 Prensado de tablero estructural tipo sándwich (a) tablero antes de aplicar presión, (b) tablero después de aplicar presión.

(7) Se retiran los tableros de la prensa y se encuentran listos (véase Figura 33).



Figura 33 Etapa final del proceso de elaboración del prototipo de tablero estructural tipo sándwich

CAPITULO IV

4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DE PROTOTIPOS DE TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH

4.1. Introducción

La naturaleza es tan inteligente que provee al hombre de todas las ideas y recursos para que sobreviva de una manera adecuada, en base a esto es que la investigación trata de biomimetizar el comportamiento, composición y estructura de algunas especies madereras de alto rendimiento mecánico. La estructura tipo sándwich cumple el objetivo de apropiar características mecánicas y maximizarlas, privilegiando el alto rendimiento mecánico de cada uno de sus componentes por unidad de masa, combinando biomateriales que brinden flexibilidad y alta resistencia a esfuerzos en un mismo compuesto.

En el presente capítulo se trata de abarcar una caracterización mecánica inicial de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich compuestos de balsa (*Ochroma pyramidale*) y melina (*Gmelina arborea*), la cual empezará determinando propiedades físicas básicas como densidad seca y contenido de humedad, para el prototipo de tablero compuesto y para cada uno de sus componentes, así mismo se determinarán propiedades mecánicas del prototipo tales como compresión, tracción, flexión y corte según la normativa americana ASTM, en cada apartado se dará a conocer la dirección de las fibras en las que actúa la aplicación de la carga y el código de normativa utilizado.

Para cada ensayo se determinaron propiedades mecánicas específicas. En el ensayo de compresión se calculó el módulo de elasticidad (MOE) y el esfuerzo último a compresión; en el ensayo de tracción se determinó la máxima fuerza a tracción plana, con el ensayo de flexión se obtuvo un valor aproximado al esfuerzo último a corte del núcleo y el esfuerzo último a flexión de los paneles exteriores, el ensayo de corte brindó la información sobre esfuerzo de corte y el módulo de cizallamiento (G) ambos del material del núcleo.

Los resultados obtenidos una vez que se procesó los datos, fueron comparados, analizados y discutidos con estudios relacionados al tema de investigación.

En los últimos tiempos se ha constatado un incremento significativo del interés de los productores, comercializadores y consumidores por la calidad de los productos derivados de la madera (Barreiro Elorza & Ruiz-Altisent, 1996). Estos a su vez deben ser comparados en base a qué tan alto es su rendimiento mecánico y la forma de hacerlo es caracterizando el material mecánicamente.

Para llevar a cabo este trabajo todos los especímenes de ensayo para cada prueba, se obtuvieron de prototipos completos de medidas estándar (1.20 m x 0.60 m) los cuales fueron elaborados en la provincia de Los Ríos, Quevedo; el proceso de su elaboración y procedencia se puede consultar en el Capítulo III. Cabe recalcar que son dos prototipos diferentes, ya que sus espesores varían, para fines investigativos definiremos al de menor espesor como Prototipo 1 (1200 mm x 600 mm x 77.4 mm) y al de mayor espesor como Prototipo 2 (1200 mm x 600 mm x 156 mm), véase Figura 34.

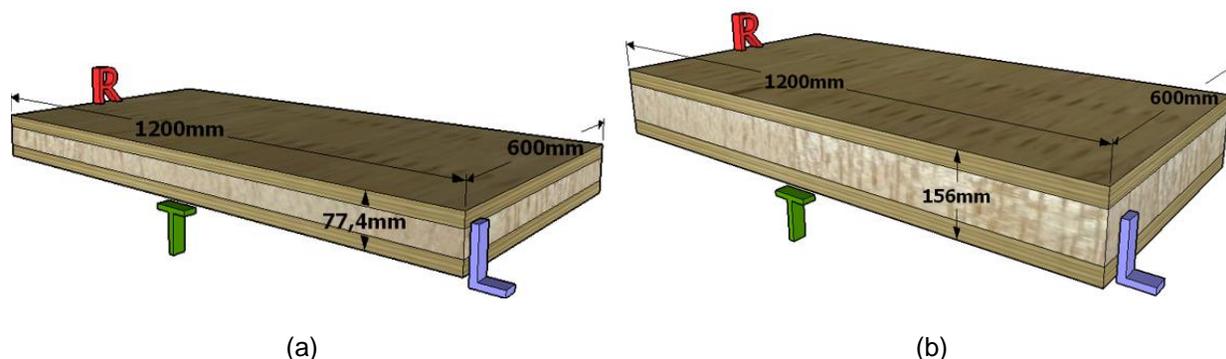


Figura 34 Geometría estándar y sus respectivos sentidos de estudio (a) Prototipo 1, (b) Prototipo 2.

En la Figura 34, se puede observar cómo se han definido los sentidos de estudio de los prototipos 1 y 2, los cuales son longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T).

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Densidad y contenido de humedad

4.2.1.1. Prototipo de tablero estructural tipo sándwich

Se llevaron a cabo un total de 6 pruebas de densidad y contenido de humedad, tal como especifica la norma ASTM C271 Standard Test Method for Density of Sándwich Core Materials. Este método de prueba proporciona una práctica estándar para obtener datos de densidad, cuyo fin será el control de calidad, investigación y desarrollo.

El total de muestras ensayadas fueron 6 ya que se disponía de dos espesores de prototipos de tablero estructural tipo sándwich y la norma exige al menos tres especímenes de prueba por cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich (ver en Figura 35).

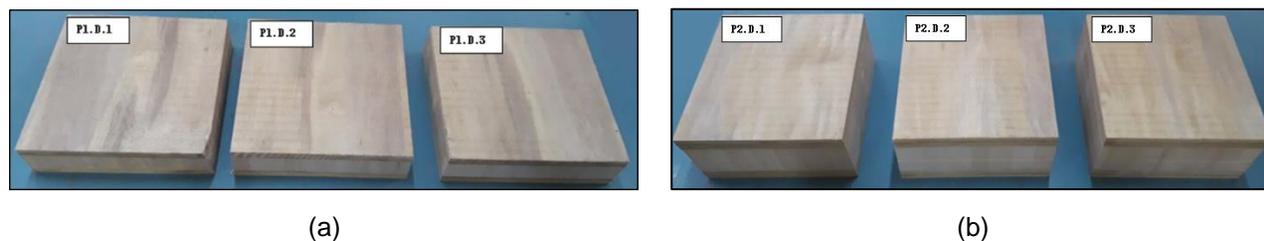


Figura 35 Muestras para ensayo de densidad de (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

4.2.1.1.1. Selección de material

Las muestras para cada espesor de prototipo se seleccionaron aleatoriamente de un prototipo de tablero estructural tipo sándwich de medidas estándar (1.20 m x 0.60 m) el cual, al ser un material homogéneo, no interviene en la decisión al momento de hacer la elección.

4.2.1.1.2. Preparación de material

Las muestras se prepararon de tal manera que se garantice el éxito del ensayo, se cortaron 3 especímenes por cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich, cuyas dimensiones se rigieron según la norma ASTM C271, adoptando un largo de 300 mm y un ancho de 300 mm, el espesor cambia para cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich siendo su variación 77.4 mm el espesor mínimo y 156 mm el máximo (ver Tabla 5).

Tabla 5*Muestras seleccionadas para el ensayo de densidad.*

Muestra	Dimensiones de la muestra		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
P1.D.1	299,0	299,5	77,4
P1.D.2	301,1	301,1	77,4
P1.D.3	300,8	301,1	77,4
P2.D.1	297,8	301,2	155,8
P2.D.2	297,5	301,6	155,8
P2.D.3	298,0	301,3	155,8

(a) Identificación de muestras

Para la correcta identificación de cada muestra se procedió a nombrar con un código específico cada probeta, este consta de tres partes, la primera parte identifica de qué prototipo de tablero estructural tipo sándwich se extrajo la muestra, siendo el de menor espesor identificado con P1 y el de mayor espesor con P2; la siguiente parte del código es en la que se especifica el tipo de ensayo, al tratarse del ensayo de densidad se coloca la letra D, el último componente es la numeración que se da a cada muestra, es decir este variará dependiendo de cuantas muestras se ensayarán.

4.2.1.1.3. Protocolo de ensayo

Las pruebas de densidad se llevaron a cabo en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", en un horno marca Quincy, de 0.085 m³ de capacidad y un voltaje de 110 V. Para la correcta medición geométrica de las probetas se utilizó un calibrador electrónico Fowler con precisión a 0.01 mm, el equipo

experimental se complementó con una balanza Shimadzu de precisión 0.1 g y un termómetro para comprobar la temperatura del horno.

A continuación, se detalla el proceso de la prueba de densidad para prototipos de tablero estructural tipo sándwich.

- El primer paso fue identificar si las muestras se encontraban acorde a los condicionamientos de la norma ASTM C271, esto quiere decir sin imperfecciones por el proceso de aserrío o fallas visibles por efectos de producción.
- Posteriormente se procede a medir geoméricamente las dimensiones de cada muestra y pesar de igual manera cada una.
- El siguiente paso es colocar las muestras dentro del horno a una temperatura de 105 ± 3 °C.
- Una vez que se ha realizado esto se lo deja durante 24 horas y se lo vuelve a pesar y medir; este paso se debe repetir hasta que las muestras tengan un peso constante con una variación de $\pm 1\%$.

Para cada muestra ensayada a densidad se calculó su contenido de humedad y su densidad seca.

4.2.1.1.4. Densidad seca al horno

La densidad seca al horno se define como la relación entre el peso seco de la madera y el volumen seco de la misma (Dora & Monteoliva, 2009). Esta propiedad tiene

un efecto preponderante sobre el rendimiento y comportamiento mecánico de la madera, se considera como una de las más importantes para todos los productos maderables derivados de especies forestales (Manzo & Hernández, 1997).

Para determinar la densidad seca de la muestra se aplicó la Ecuación 1, proporcionada por la norma ASTM C271 como,

$$d = \frac{w}{v} \quad (1)$$

donde d es la densidad seca en kg/m^3 , w es la masa final después del condicionamiento en kilogramos kg y v el volumen final después del condicionamiento en m^3 .

4.2.1.1.5. Contenido de humedad

El contenido de humedad se define como la relación entre la masa de agua retenida en la madera y la masa de esta cuando se encuentra en estado seco (Seco, 2003). La Ecuación 2, se utilizó en este estudio para determinar el contenido de humedad de las muestras ensayadas,

$$M.C. = \frac{W_t - W_o}{W_o} \times 100 \quad (2)$$

donde W_t es el peso de la muestra el momento de realizar el ensayo y W_o es el peso seco de la muestra después del condicionamiento.

4.2.1.2. Análisis de materiales de prototipos de tablero estructural tipo sándwich

Se experimentó a cabo un total de 40 muestras de densidad para los elementos del prototipo de tablero estructural tipo sándwich por separado, siguiendo la norma ASTM D2395 (2014) Standard Test Method for Density and Specific Gravity (relative density) of Wood and Wood Based Materials.

La división de las muestras se produjo de la siguiente manera, 10 para el material del núcleo y 10 para el material de los paneles externos, en el prototipo de menor espesor; se realizó el mismo procedimiento para el tablero de mayores dimensiones. Las muestras se seleccionaron del mismo prototipo que se cortó para la prueba de la Sección 4.2.1.1, para identificar mejor a las muestras véase Figura 36.

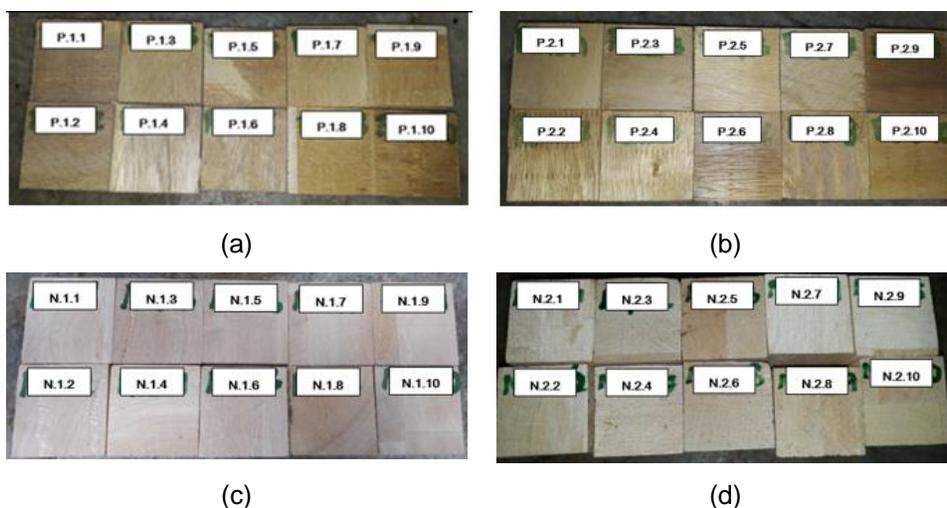


Figura 36 Muestras de elementos de prototipo de tablero estructural tipo sándwich para ensayo de densidad, (a) paneles externos de melina del prototipo de tablero 1, (b) paneles externos del prototipo de tablero 2, (c) panel de núcleo de balsa del prototipo de tablero 1, (d) panel de núcleo de balsa del prototipo de tablero 2

4.2.1.2.1. Selección de material

Los 10 especímenes para cada espesor se seleccionaron aleatoriamente de un conjunto de 20 muestras por cada tipo de material, esto garantiza que los resultados en el ensayo estén apegados a la realidad.

4.2.1.2.2. Preparación del material

Un total de 40 muestras fueron ensayadas para determinar su densidad seca al horno, las dimensiones de cada muestra fueron establecidas de la norma ASTM D2395 la cual indica que el espécimen debe tener una área transversal que permita determinar su contenido de humedad y densidad, es decir que sea suficientemente grande como para determinar sus variaciones en peso, de esta manera llegamos a obtener el tamaño nominal para cada muestra, este fue de 50 mm x 50 mm x (espesor de cada material en su respectivo prototipo). En la Tabla 6 se identifica cada tipo de muestra con sus dimensiones y su respectivo código de identificación.

Tabla 6*Muestras de elementos separados seleccionados para el ensayo de densidad*

Muestra	Dimensiones (mm)		
	Largo	Ancho	Espesor
P.1.1	50,8	50,8	14,6
P.1.2	50,6	50,7	14,8
P.1.3	49,0	50,8	14,5
P.1.4	50,6	50,8	14,6
P.1.5	50,0	48,4	14,3
P.1.6	50,0	49,6	14,7
P.1.7	49,0	50,8	14,2
P.1.8	50,0	50,9	17,0
P.1.9	49,6	50,8	17,0
P.1.10	50,8	50,8	16,8
P.2.1	50,6	50,8	33,6
P.2.2	50,5	50,8	33,8
P.2.3	50,8	50,6	33,4
P.2.4	50,8	50,8	33,6
P.2.5	50,6	51,0	33,6
P.2.6	50,6	50,8	32,6
P.2.7	50,8	50,2	33,1
P.2.8	50,8	50,9	33,4
P.2.9	50,9	50,8	32,5
P.2.10	51,1	50,6	33,6
N.1.1	50,8	51,2	44,8
N.1.2	50,6	50,8	44,2
N.1.3	50,8	51,0	44,6
N.1.4	50,0	50,8	44,4
N.1.5	50,9	51,0	44,4
N.1.6	50,6	50,6	44,3
N.1.7	50,6	50,4	44,2
N.1.8	51,2	51,2	44,8
N.1.9	50,8	50,8	44,6
N.1.10	50,8	51,2	44,3
N.2.1	50,8	50,6	89,5
N.2.2	50,9	49,8	89,6
N.2.3	50,8	50,4	89,5
N.2.4	49,6	51,1	89,5
N.2.5	51,7	50,8	89,9
N.2.6	51,2	50,7	89,5
N.2.7	50,1	51,0	89,8
N.2.8	51,0	51,4	89,8
N.2.9	51,0	50,5	89,2
N.2.10	50,5	51,0	89,2

(a) Identificación de muestras

Para poder trabajar de mejor manera al momento de la recolección de datos, se procedió a identificar cada una de las muestras con su respectivo código, el cual consta de tres partes, en la primera se colocó la letra N o P diferenciando si era material del panel de núcleo de balsa o de las paneles externos de melina, posteriormente se colocó el número 1 si se trataba del prototipo de menor espesor y 2 en el de mayor espesor, para finalizar se colocó el número de identificación de la muestra, este número variaba del 1 al 10, ya que se ensayaron 10 muestras de cada elemento y espesor.

4.2.1.2.3. Protocolo de ensayo

Al ser el ensayo de densidad de elementos separados muy similar al de la Sección 4.2.1.1, se lleva a cabo la misma metodología de preparación de material y de igual manera se determina la densidad seca y el contenido de humedad rigiéndose a la Ecuación 1 y 2 respectivamente.

4.2.2. Ensayo de compresión

Se realizó un total de 10 pruebas de compresión, 5 para el Prototipo 1 y 5 para el Prototipo 2, (ver Figura 37). Los lineamientos y parámetros que se siguió para determinar esta propiedad se basaron en la norma ASTM C364 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions, este método de prueba cubre las propiedades de compresión de construcción sándwich estructural, en una dirección paralela al plano de las caras. La norma exige que por lo menos se ensayen cinco probetas por cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich.

La aplicación de la carga se realizará en la sección transversal (L-R), paralela a la dirección tangencial (T), para aclarar las direcciones véase Figura 34.

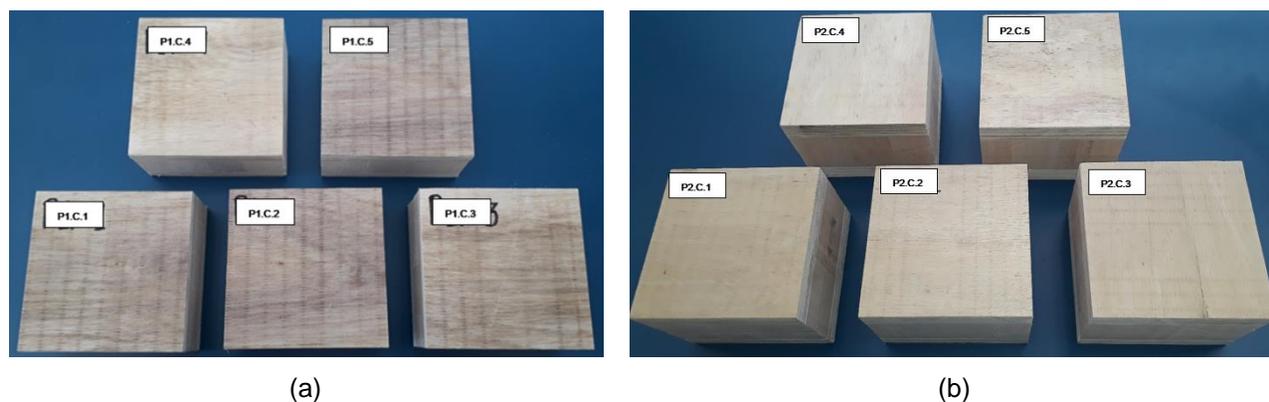


Figura 37 Muestras para ensayo mecánico compresión (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

4.2.2.1. Selección de material

Las muestras destinadas para ser ensayadas a compresión, se eligieron de forma aleatoria, todas estas se seleccionaron de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich 1 y 2 (5 de cada una), las dimensiones geométricas que deben tener las muestras se basaron en sus espesores, estas se delimitaron según la norma ASTM C364 estableciendo que para las muestras provenientes del prototipo 1 las dimensiones son (200 mm x 200 mm x 77.4 mm) y para el prototipo 2 (300 mm x 300 mm x 156 mm), véase Figura 38.

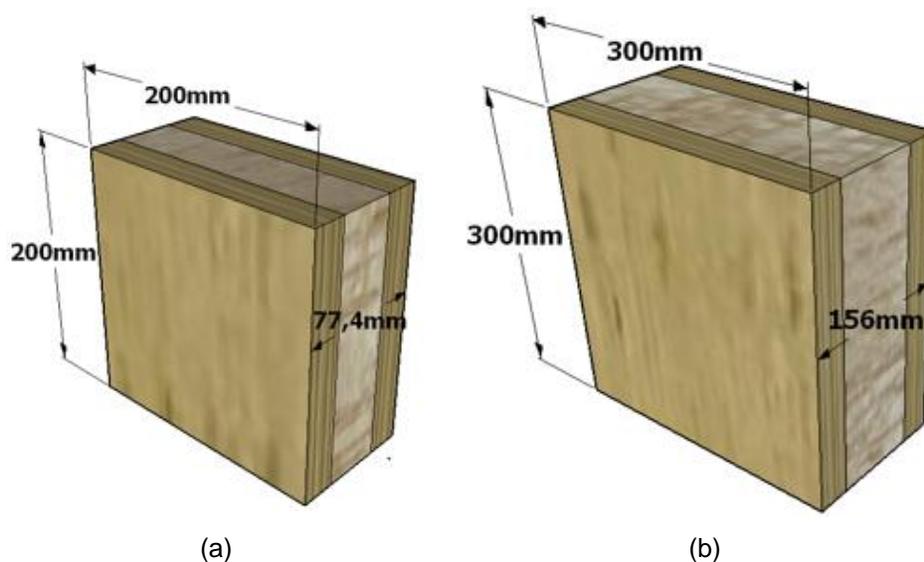


Figura 38 Dimensiones nominales de muestras para ensayo mecánico de compresión, (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

La Tabla 7 especifica el resumen de las muestras elegidas y sus dimensiones geométricas, para los ensayos a compresión.

Tabla 7

Muestras seleccionadas para ser ensayadas a compresión

Muestra	Dimensiones (mm)		
	Largo	Ancho	Espesor
P1.C.1	201,40	200,80	77,10
P1.C.2	200,90	201,00	77,50
P1.C.3	201,00	201,50	77,40
P1.C.4	201,90	202,00	78,00
P1.C.5	201,90	201,60	77,60
P2.C.1	298,60	298,40	156,10
P2.C.2	299,00	299,60	156,00
P2.C.3	299,50	298,20	156,60
P2.C.4	298,50	299,30	156,20
P2.C.5	298,20	299,10	156,70

4.2.2.2. Preparación de material

La preparación de las muestras se realizó según la norma ASTM C364 literal 6.1, en el que indica que se debe tener cuidado con las malas prácticas en la elaboración del material, la pérdida de control de alineación de las fibras y el daño inducido por un inapropiado maquinado de muestras, todo esto se realizó con el fin de evitar alta dispersión de datos en los resultados.

De la misma forma que en pruebas anteriores, se procedió a verificar que las muestras no tengan defectos por el proceso de elaboración o fallas visibles que interrumpan el ensayo de compresión.

(a) Identificación de muestras

La identificación de las muestras de compresión se realizó mediante un código de tres partes como se muestra en la Tabla 7, la primera se refiere a la procedencia de la muestra es decir si fue cortada del prototipo de tablero estructural tipo sándwich 1 (P1) o del prototipo de tablero estructural tipo sándwich 2 (P2), el elemento de la mitad se trata de la letra C ya que son especímenes destinados al ensayo de compresión y por último se coloca el número de identificación de la muestra, para el caso específico de este ensayo el número variara entre 1 y 5.

(b) Strain gauges

Los extensómetros se adhirieron en las muestras secas antes de realizar la prueba de compresión, para la colocación de galgas extensométricas se siguió el siguiente proceso (i) determinar la ubicación del extensómetro, identificando el punto medio de las caras del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, (ii) lijar las caras del tablero en el

punto aproximado de aplicación, (iii) pegar el extensómetro en el punto determinado y (iv) cubrir el extensómetro con resina plástica poliéster de dos componentes, ver Figura 39.

4.2.2.3. Protocolo del ensayo

Las pruebas de compresión se llevaron a cabo en una máquina de compresión simple marca Controls de 2000 kN de capacidad, para determinar las dimensiones de cada muestra se utilizó un calibrador electrónico Fowler con precisión a 0.01 mm, el equipo de laboratorio utilizado se complementó con una balanza Shimadzu de precisión 0.1 g y un puente medidor de deformaciones DMD-21, marca Omega, que puede medir galgas extensométricas de 120 o 350 Ohmios, en este se conectó los terminales de las galgas extensométricas. Para que la fuerza aplicada por la máquina universal sea distribuida de manera correcta y exista un contacto completo sobre las muestras, se colocaron placas de metal que aseguraban la muestra y a su vez permitían la adecuada aplicación de carga, como se puede ver en la Figura 39.

Para cada muestra ensayada a compresión se calculó su módulo de elasticidad (MOE) basándose en su esfuerzo y deformación, así como el esfuerzo máximo a compresión (MOR). El ensayo de compresión se detalla a continuación:

- Se verifica que cada muestra no tenga defectos por tajadura y tampoco desniveles entre paneles exteriores de melina y el panel de núcleo de balsa. Se adhiere en el centro de una cara R-T una galga extensométrica de un solo elemento, en dirección T, como se muestra en la Figura 39, la aplicación de la carga se realizó en la dirección Tangencial (T) de la muestra y continuo hasta

el fallo del material, el cabezal de la máquina aplica carga a una velocidad de 0.50 mm/min, para alcanzar la falla según indica la norma, entre un lapso de 3 y 6 minutos.

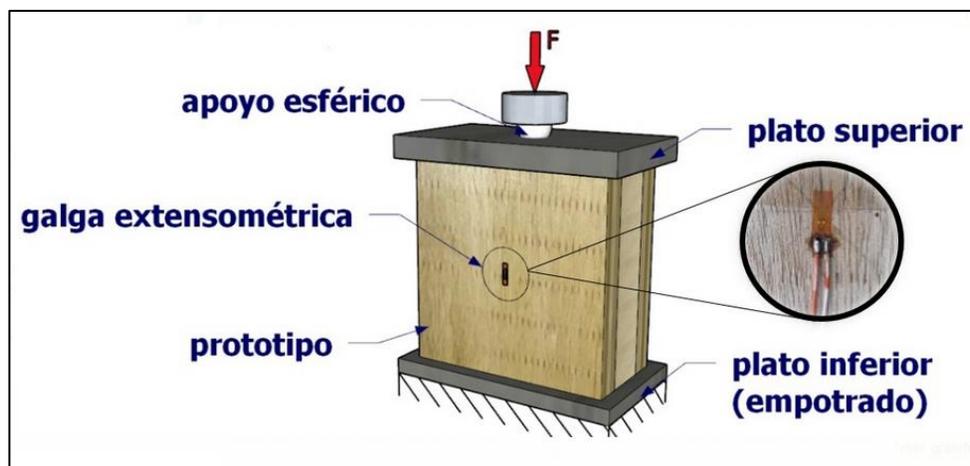


Figura 39 Detalles de la configuración del ensayo a compresión (Galgas extensométricas)

Antes de realizar la prueba se midieron las dimensiones de cada muestra y se las pesó. Todos los ensayos se los realizó a humedad y temperatura ambiente. Cada espécimen se numeró según el literal (a) de esta Sección.

4.2.2.4. Esfuerzo último a compresión

El esfuerzo a compresión se define como la fuerza aplicada dividida entre el área transversal de los paneles exteriores de melina, la fuerza aplicada es paralela a la dirección (T) y perpendicular con el área de aplicación (L-R). Ahora bien el esfuerzo último a compresión se entiende como el mayor valor de esfuerzo de compresión que puede ser aplicado sobre el material, por lo general cuando se alcanza el esfuerzo último, inicia la fractura y posteriormente el fallo del material (Cañas, 2008).

Para calcular el esfuerzo último a compresión, se utilizó la Ecuación 3 proporcionada por la norma ASTM C364, que se muestra a continuación,

$$MOR = \frac{P_{max}}{w(2 * t_{fs})} \quad (3)$$

donde MOR es el esfuerzo último a compresión medido en (MPa), P_{max} es la fuerza máxima aplicada antes de la falla en dirección tangencial (T), medida en Newtons (N), w es el ancho del espécimen (mm) y t_{fs} es el espesor de una de las caras (mm).

4.2.2.5. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (MOE), es indispensable para poder diseñar cualquier elemento mecánico - estructural que sea sometido a esfuerzos (Meza et al., 2008), este es el valor que determina la rigidez del material, su cálculo está basado en la relación entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y la deformación unitaria. Este valor es aplicable únicamente en el rango elástico del material, es decir que si al material se le descarga o se le deja de aplicar carga, no conservará deformación y regresará a su estado inicial (Spavento et al., 2008).

El módulo de elasticidad a compresión fue calculado en base a la fórmula de Hooke, Ecuación 4:

$$\sigma_c = MOE * \varepsilon \quad (4)$$

donde σ_c es el esfuerzo aplicado en dirección (T) de la muestra, ε es el valor de deformación unitaria en dirección (T) obtenido de las galgas extensométricas colocadas y MOE es el valor de módulo de elasticidad para el material.

En vista de que contamos con todos los valores para determinar el MOE, se procedió al despeje de este valor de la Ecuación 4, obteniendo así la Ecuación 5.

$$MOE = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} \quad (5)$$

En base a la Ecuación 5, se utilizó la pendiente de la gráfica esfuerzo (MPa) vs deformación unitaria (mm/mm), para calcular el módulo de elasticidad de cada muestra, un ejemplo de esto se puede apreciar en la Figura 40, en la que se establece el rango elástico del material y se dibuja la línea de tendencia, para después determinar la ecuación de la misma, obteniendo la pendiente y el valor de MOE.

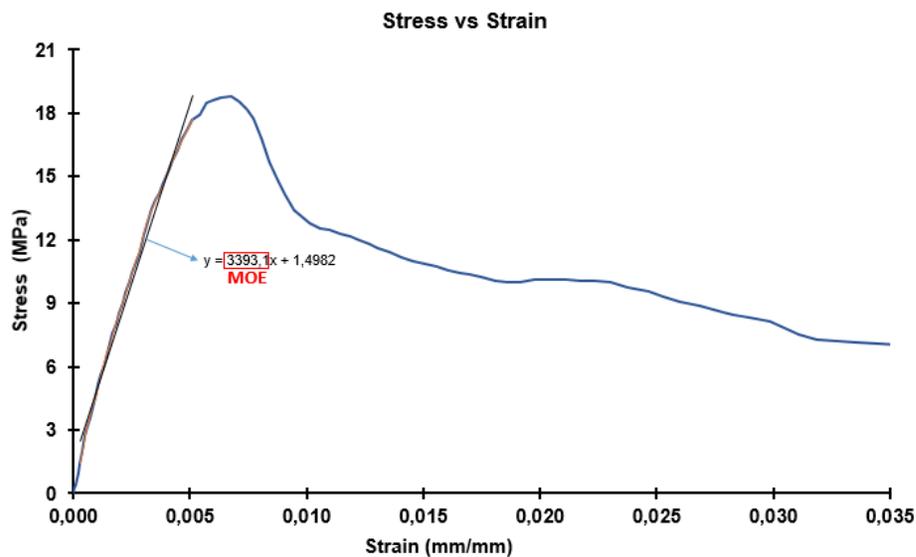


Figura 40 Ejemplo práctico de cálculo de Módulo de elasticidad (Gráfica Stress vs Strain)

4.2.3. Ensayo de tracción

Para llevar a cabo la prueba de tracción se siguió la metodología planteada por la norma ASTM C297 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions. Este método de prueba cubre la determinación de la resistencia a la tracción plana del núcleo, la unión entre panel de núcleo balsa y el panel externo de melina de un prototipo de tablero estructural tipo sándwich. Este consiste en someter una construcción tipo sándwich a una fuerza de tracción uniaxial normal al plano del sándwich, para nuestro caso la carga será aplica en dirección longitudinal (L), sobre la superficie establecida por las direcciones (T-R), la fuerza se transmite al prototipo a través de bloques de carga (acoples metálicos). En total se realizaron 10 pruebas de tracción, 5 para el prototipo de tablero 1 y 5 para el prototipo de tablero 2, cuyo tamaño nominal fue de (50 mm x 50 mm x espesor de cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich), ver en Figura 41, las cuales fueron seleccionadas del prototipo de tablero estructural de tamaño nominal (1.20 m x .60 m).

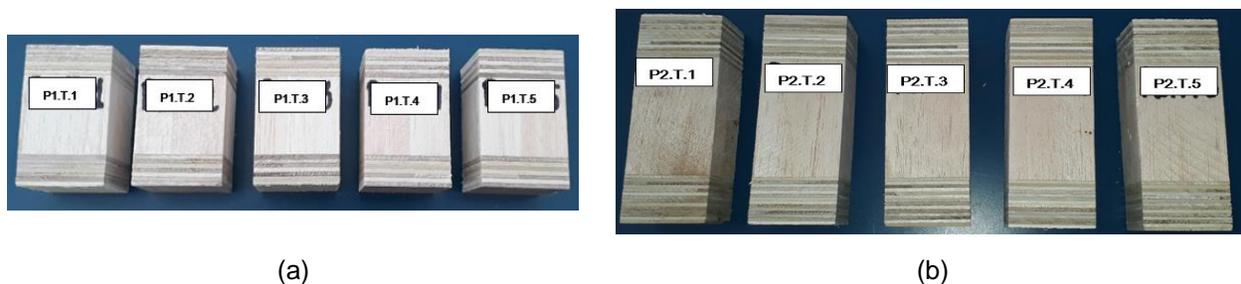


Figura 41 Muestras para ensayo de tracción (a) prototipo de tablero estructural 1 y (b) prototipo de tablero estructural 2

4.2.3.1. Selección de material

Las muestras de tracción se cortaron de prototipos de tablero estructural tipo sándwich completos, la selección de los mismos fue de forma aleatoria ya que las muestras fueron extraídas de diferentes ubicaciones dentro del área del prototipo de tablero. Las direcciones L, T y R son las indicadas en la sección 4.1. Se realizaron 10 probetas destinadas a tracción, cinco por cada prototipo de tablero (1-2). Cada muestra se identificó con un código, para llevar un control ordenado de secuencia de ensayos, como se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 8

Muestras destinadas a ser ensayadas bajo el modo mecánico de tracción.

Muestra	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
P2.T.1	49,8	50,0	156,4
P2.T.2	49,2	50,2	156,3
P2.T.3	48,9	49,8	156,6
P2.T.4	50,0	50,2	155,9
P2.T.5	50,1	50,3	155,7
P1.T.1	49,3	49,3	77,4
P1.T.2	49,4	50,3	77,2
P1.T.3	50,0	50,1	77,0
P1.T.4	50,1	50,1	77,3
P1.T.5	50,0	49,9	77,1

4.2.3.2. Preparación de material

Las probetas se prepararon de acuerdo a la norma ASTM C297 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions. Para garantizar rangos aceptables de desviación estándar y/o coeficientes de variación, se controló parámetros como, alineación de fibra, malas prácticas de fabricación de materiales y se realizó la

correcta colocación de las muestras, en la máquina de ensayos universales. De cada muestra se verificó que no existan núcleos incompletos o no uniformes a los revestimientos, también que no existan huecos, discontinuidades, curvaturas fuera del plano y variaciones de espesor.

En cuanto a las dimensiones de la muestra, la norma dice que el área mínima de aplicación de carga, para tableros cuyos núcleos son continuos (balsa, madera, espuma), debe ser de 625 mm^2 , por lo tanto para ambos espesores de prototipos hemos establecido que las dimensiones serán, en dirección tangencial (T) 50 mm, en dirección radial (R) 50 mm y en dirección longitudinal (L) el valor respectivo al espesor del prototipo de tablero estructural 1 y 2, 77.4 mm y 156 mm, respectivamente. Cabe recalcar que la norma exige que el área de aplicación sea de forma cuadrada o circular; en este caso se adoptó un área cuadrada, ver Figura 42.

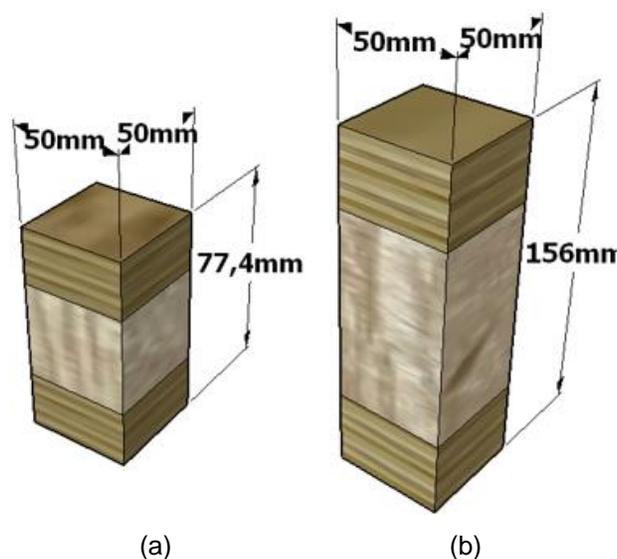


Figura 42 Dimensiones nominales de muestras destinadas a ser ensayadas a tracción (a) prototipo de tablero estructural 1 y (b) prototipo de tablero estructural 2

(a) Identificación de muestras

En cuanto a la identificación de las muestras de tracción, se realizó mediante un código que se compone de tres partes, la primera indica el prototipo de tablero, este puede ser (P1-P2), la segunda parte lleva la letra respectiva al ensayo que se dispone realizar para este caso será la letra T y para finalizar el código se numera cada muestra del 1 al 5. Para entender mejor este tipo de codificación establecemos el siguiente ejemplo, "P1.T.5", esto quiere decir que la muestra pertenece al prototipo de tablero estructural 1, va a ser ensayada a tracción y es la quinta muestra a probar dentro de este grupo.

4.2.3.3. Configuración de ensayo

El ensayo de tracción se llevó a cabo en una máquina ensayos universales Shimadzu, cuya capacidad es de 50 kN. Para poder llevar a cabo el ensayo se realizó acoples metálicos para cada muestra, como se puede ver en la Figura 43, estos se encargaban de transmitir la carga de tracción al prototipo de tablero estructural.

Para determinar las propiedades geométricas se utilizó un calibrador electrónico Fowler con precisión a 0.01 mm, de igual manera para obtener el peso de las muestras se usó una balanza Shimadzu de precisión 0.1 g. La macilla plástica poliéster marca Sherwin Williams, se utilizó para adherir fuertemente la muestra con los acoples metálicos y que de esta manera no exista fallas por la unión de la misma con los aditamentos. Se estableció una velocidad de aplicación de carga igual a 1 mm/min que aseguró un tiempo

de ensayo entre 3 y 6 min. La configuración del ensayo de tracción previo a la aplicación de la carga se lo puede observar en la Figura 43.

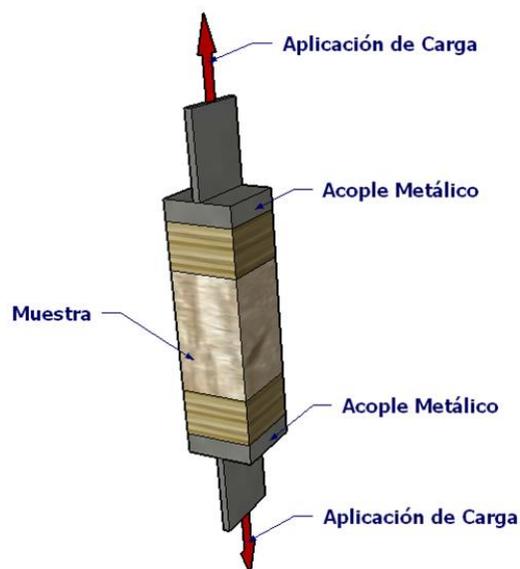


Figura 43 Configuración de ensayo de tracción

Para cada muestra ensayada a tracción se determinó el esfuerzo último a tracción plana y la gráfica fuerza vs desplazamiento de cabezal, el procedimiento que se realizó en cada muestra se lo especifica a continuación.

- Para iniciar se verifica que las muestras no tengan imperfecciones visibles y se controla que no haya desalineaciones o desfases en sus medidas, acto seguido se procede a identificar cada muestra con el código establecido, se pesa y se miden todas sus dimensiones.
- Una vez que las muestras están listas se procede a adherir los acoples. Para realizar este procedimiento se mezcla la macilla plástica con su reactivo, en una proporción 10:1, que indica que por cada 10 partes de macilla se coloca 1

parte reactivo secante, ahora se coloca la mezcla entre la placa y la muestra, para que después se seque durante 24 horas, a temperatura ambiente.

- Posteriormente se colocó la muestra en la máquina de ensayos universales Shimadzy (50 kN), se aplicó carga a tracción en dirección longitudinal (L), a una velocidad de 1 mm/min y se obtuvo datos de fuerza y desplazamiento, junto a la gráfica establecida por estos valores.

4.2.3.4. Esfuerzo último a tracción plana

Para determinar el esfuerzo último a tracción plana se utilizó la Ecuación 6, tomada de la norma ASTM C297,

$$F_z^{ftu} = \frac{P_{max}}{A} \quad (6)$$

donde F_z^{ftu} es el esfuerzo último a tracción plana en (MPa), P_{max} es la fuerza máxima antes de la falla del elemento en (N) y A es el área de la sección transversal (mm^2), esta área es perpendicular a la dirección de la fuerza.

4.2.4. Ensayo de flexión

En el desarrollo del ensayo de flexión se siguió la metodología determinada por la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. Este método de ensayo cubre la determinación de las propiedades de cizallamiento del núcleo de construcciones sándwich sometidas a flexión, de tal manera que los momentos aplicados produzcan la curvatura de los planos opuestos. Esta práctica consiste en someter una viga de construcción tipo sándwich, a

un momento de flexión normal al plano del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, es decir un momento alrededor de la dirección radial (R). Se ensayaron un total de 10 especímenes a flexión, de los cuales 5 fueron del prototipo 1 y 5 del prototipo 2 (véase Figura 44), el tamaño nominal de cada muestra se presenta en la Sección 4.2.4.1.

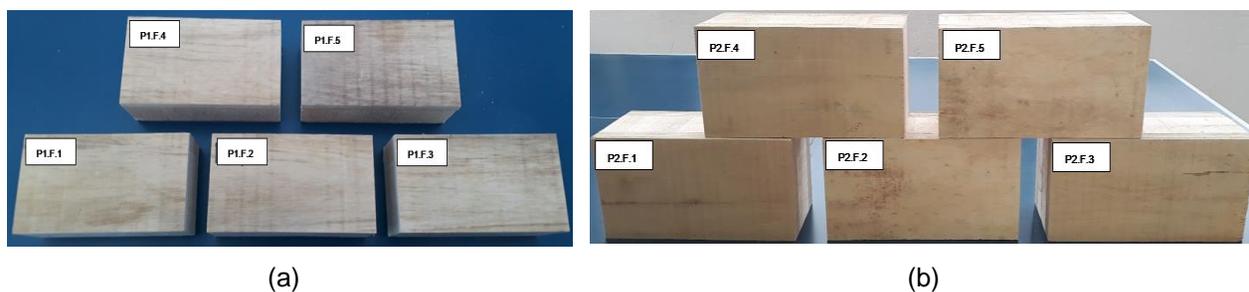


Figura 44 Muestras para ensayo de flexión, (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

4.2.4.1. Selección de material

Las probetas destinadas para el ensayo a flexión se cortaron de un prototipo completo por cada espesor respectivamente, la forma de selección del material fue aleatoria, pero a su vez se trató de optimizar la cantidad de material. Para establecer las dimensiones de cada muestra se siguió los lineamientos dados por la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure y se determinó que para muestras provenientes del prototipo 1, las dimensiones nominales serían (150 mm x 300 mm x 77.8 mm) y para el prototipo 2 (300 mm x 600 mm x 156 mm). Las direcciones de estudio serán las establecidas en la Sección 4.1, el compendio de muestras para el ensayo de flexión y sus dimensiones se pueden ver en la Tabla 9.

Tabla 9

Muestras destinadas a ser ensayadas bajo el modo mecánico de flexión

Muestra	Dimensiones		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
P1.F.1	300,60	154,30	77,90
P1.F.2	300,60	156,00	77,40
P1.F.3	300,60	156,50	77,40
P1.F.4	300,59	154,30	77,60
P1.F.5	300,42	155,20	77,50
P2.F.1	598,30	297,21	157,60
P2.F.2	598,10	296,10	157,90
P2.F.3	598,50	297,00	158,00
P2.F.4	599,00	296,00	156,10
P2.F.5	597,50	297,20	157,20

4.2.4.2. Preparación de material

Las muestras fueron preparadas según la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, en cada muestra se controló que las prácticas para la elaboración sean adecuadas y que no exista daño por trabajos de aserrío en el material; se tomó precauciones para evitar muescas, superficies ásperas o irregularidades por el corte de las muestras.

Las dimensiones que se muestran en la Figura 45, se determinaron en base al tipo de configuración del prototipo, según la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, si se mantiene una relación, $t/c \leq 0.10$, considerando que t , es el espesor del sándwich y c el espesor del núcleo, esta viene a ser una configuración standard y si la relación ≥ 0.10 correspondientemente sería una configuración no standard, al llegar a esa conclusión la norma establece que el ancho sea aproximadamente el doble del espesor del prototipo y

el largo por lo menos el doble del ancho, teniendo al final las dimensiones nominales presentadas en la Sección 4.2.4.1, (véase Figura 45). Por otro lado, en cada muestra se marcó guías para que la aplicación de la fuerza y los apoyos sean en los puntos exactos.

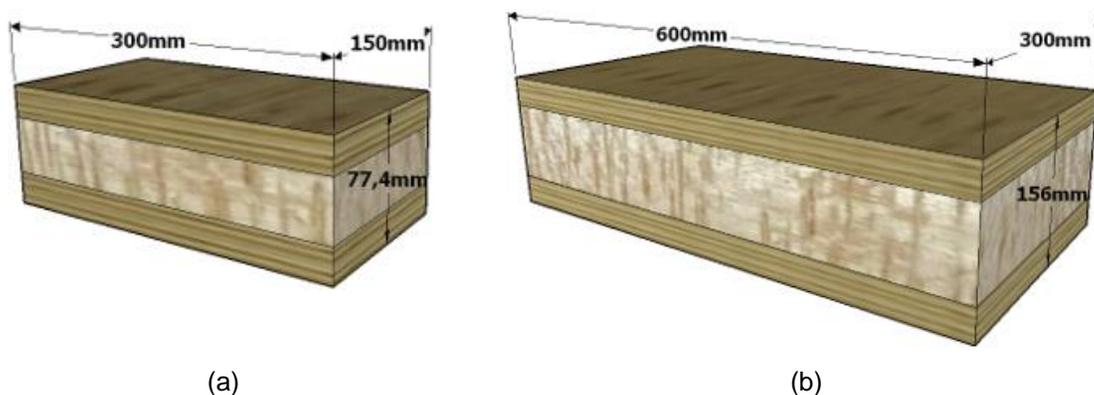


Figura 45 Dimensiones nominales de muestras destinadas al ensayo de flexión (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

(a) Identificación de muestras

Al igual que en ensayos anteriores, cada muestra será identificada con un código de tres partes, la primera y tercera parte del código seguirán los lineamientos de identificación de todos los ensayos, la única parte que cambia es la letra que determina de que ensayo se trata, para los ensayos de flexión la letra correspondiente será “F”, ejemplo de código, “P2.F.4”, en este caso particular se estaría identificando a una muestra del prototipo de tablero estructural tipo sándwich 2, que va a ser ensayada a flexión y su numeración es 4.

4.2.4.3. Configuración de ensayo

El ensayo de flexión se realizó en un vibrafono de baja frecuencia marca Amsler, modelo 417 U, cuya capacidad máxima es de 100 Tn. Al igual que en otros ensayos se

tuvo que realizar acoples metálicos para poder efectuar el ensayo, en este caso se elaboró un distribuidor de carga de dos puntos, los cuales estaban situados a $1/3$ de la longitud entre apoyos (S), véase Figura 46.

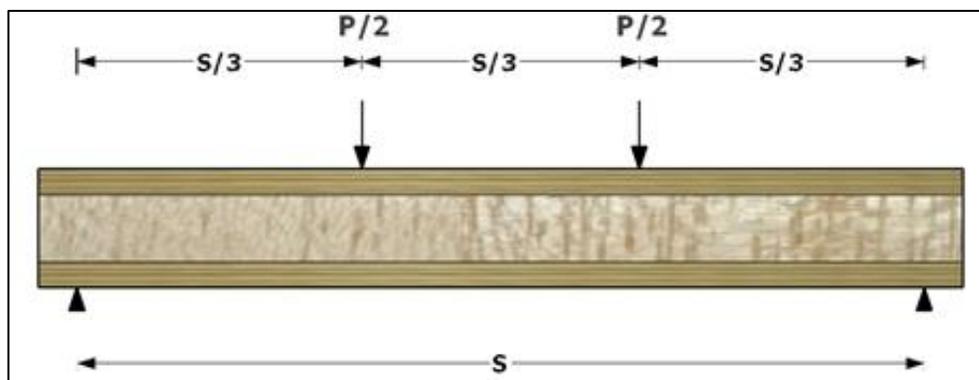


Figura 46 Distribución y aplicación de carga para prueba de flexión en cuatro puntos

Siguiendo con la configuración del ensayo se procede a determinar las propiedades geométricas del prototipo de ensayo, mediante el uso de un calibrador electrónico Fowler con precisión a 0.01 mm. Para la obtención del peso se utilizó una balanza Shimadzu de precisión 0.1 g., también se utilizaron cuatro bandas de neopreno para cada tipo de muestra, estas bandas tenían una dureza de 60 y se utilizaron para que la aplicación puntual de la carga no altere el comportamiento de los paneles externos del prototipo, también se utilizó una gata hidráulica cuyo propósito fue aplicar carga de manera controlada a la muestra. Para complementar el equipo de laboratorio se utilizó un deformímetro digital conectado a la máquina de ensayos universales, destinado a medir la deformación en el centro de la viga.

La velocidad de carga fue de 1 mm/min, la cual garantizó que la prueba tenga un tiempo de duración entre 3 y 6 minutos. La configuración completa del ensayo se puede apreciar en la Figura 47.

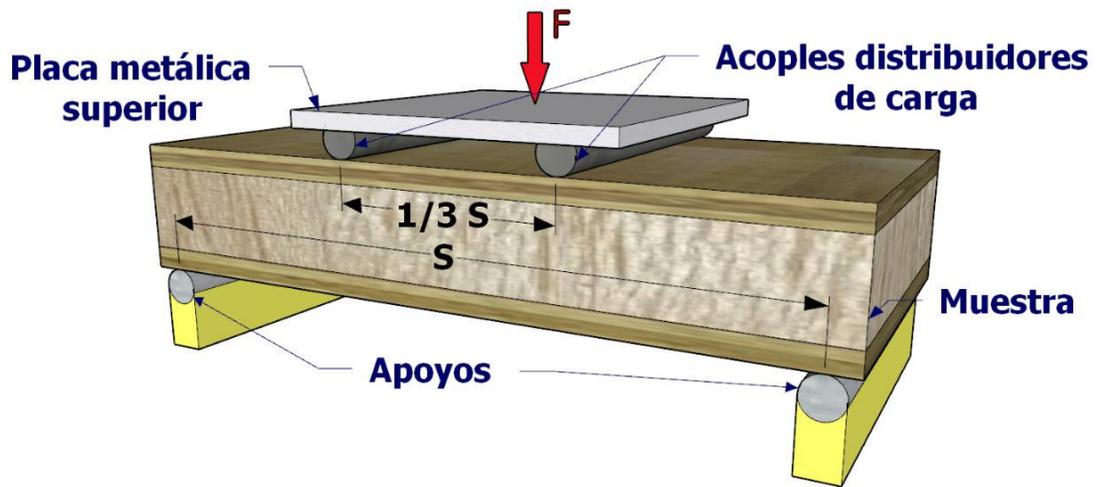


Figura 47 Configuración de ensayo mecánico de flexión

Para cada probeta ensayada a flexión se obtuvo el esfuerzo último a corte del núcleo y el esfuerzo de flexión de los paneles externos. El protocolo de este ensayo es el siguiente:

- Se procede a inspeccionar cada muestra hasta determinar que se encuentre en condiciones óptimas para ensayar. Acto seguido se coloca el código respectivo y se procede a determinar su peso y sus propiedades geométricas.
- Se pintan las guías para los puntos de apoyo, se coloca la muestra en la máquina de ensayos universales, sobre esta se coloca el acople distribuidor de carga y se ubica el deformímetro digital en el centro de la viga.

- Para completar el ensayo se aplica carga a velocidad constante de 1 mm/min hasta llegar a la falla del material.

4.2.4.4. Esfuerzo último a corte del núcleo

Para calcular el esfuerzo último a corte del núcleo, se utilizó la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, que provee la Ecuación 7,

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d + c)b} \quad (7)$$

donde F_s^{ult} es el esfuerzo último a corte del núcleo (MPa), P_{max} es la fuerza máxima aplicada antes de la falla en sentido longitudinal (N), c es el espesor nominal del núcleo (mm), d es el espesor del sándwich (mm) y b es el ancho del prototipo de tablero estructural tipo sándwich (mm).

4.2.4.5. Esfuerzo de flexión de los paneles externos

La determinación del esfuerzo de flexión de paneles externos, fue realizado en base a la Ecuación 8, que presenta la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. Esta ecuación considera que se aplicó la carga en cuatro puntos,

$$\sigma = \frac{P_{max}S}{3t(d + c)b} \quad (8)$$

donde σ es el esfuerzo a flexión de los paneles externos (MPa), S es la longitud entre apoyos, t es el espesor nominal del panel externo (mm), los términos que no se identificaron en esta sección se los puede revisar en la sección 4.2.4.4.

4.2.5. Ensayo de corte

El ensayo de corte se rigió a la norma ASTM C273 Standard Test Method For Shear Properties of Sandwich Core Materials. Este método cubre la determinación de la resistencia al corte paralelo al plano del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, y el módulo de corte asociado con las deformaciones en un plano normal a los revestimientos o caras. La práctica consiste en aplicar una carga a compresión o tracción, en dirección longitudinal (L) y tangencial (T). En total se ensayaron 10 especímenes a corte, con un tamaño nominal de 300 mm x 60 mm x espesor respectivo de cada prototipo, (véase Figura 48).



Figura 48 Muestras para ensayo de corte (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

4.2.5.1. Selección de material

Las muestras destinadas para el ensayo de corte, se seleccionaron de forma aleatoria de cada prototipo. Las dimensiones nominales adoptadas para este caso son

300 mm x 60 mm x espesor de cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich. La dirección longitudinal, tangencial y radial de las muestras de corte serán las establecidas en la sección 4.1. Las dimensiones geométricas y la identificación para cada muestra se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10
Muestras destinadas para el ensayo de corte

Muestra	Dimensiones		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
P1.S.1	312,10	60,00	77,90
P1.S.2	311,80	60,30	77,30
P1.S.3	312,30	60,00	77,10
P1.S.4	312,90	61,00	77,90
P1.S.5	311,00	64,20	78,10
P2.S.1	309,80	64,50	156,20
P2.S.2	310,00	64,80	156,80
P2.S.3	309,90	65,00	156,60
P2.S.4	310,20	64,00	156,60
P2.S.5	310,80	66,60	157,10

4.2.5.2. Preparación de material

Los especímenes fueron preparados según la norma ASTM C273 Standard Test Method For Shear Properties of Sandwich Core Materials, se verificó que no existan fallas por la calidad del material o por mala maquinación el momento de realizar el corte de muestras. Para establecer el dimensionamiento de muestras presentado en la Tabla 10, se realizaron pruebas piloto en la que el ancho fue de 60 mm y se varió el largo hasta que la muestra presente fallas por corte, llegando así a la dimensión nominal de 300 mm de largo, 60 mm de ancho y el espesor de cada prototipo de tablero estructural tipo

sándwich, (véase Figura 49). En el caso de que alguna muestra presentara fallas graves previo al ensayo esta era reemplazada por una muestra en buenas condiciones.

En la mayoría de muestras cortadas por sierra circular quedaban ciertas irregularidades que se solventaban lijando suavemente. Todas las muestras fueron identificadas con un código propio que se especifica en el literal (a).

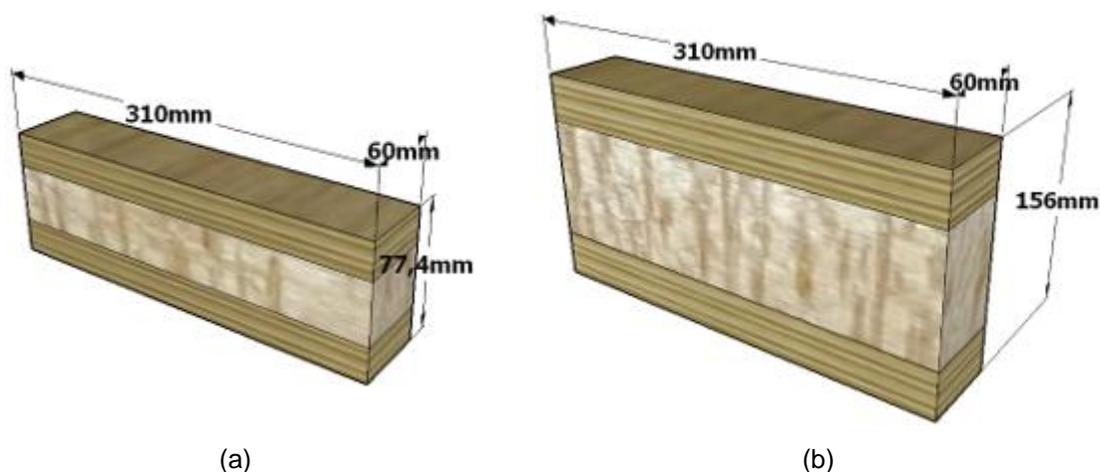


Figura 49 Dimensiones nominales de muestras destinadas al ensayo de corte (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

(a) Identificación de muestras

Para tener una correcta identificación de las muestras, se procedió a colocar un código a cada una, este disponía de tres partes, al igual que en otros apartados, se siguen los lineamientos antes presentados para la primera y la tercera parte, la sección que sufre cambio es la segunda parte en la que se coloca la letra “S” por corte en inglés (shear), para dejar en claro cómo fue la identificación se presenta el siguiente ejemplo, “P2.S.1”, para este caso se trata de una muestra proveniente del prototipo de tablero estructural tipo sándwich 2, a ser ensayada a corte, siendo la primera del lote de cinco.

4.2.5.3. Configuración de ensayo

Las pruebas de corte se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C273, para esto se utilizó una máquina de ensayos universales marca Amsler, modelo FM – 1033, cuya capacidad a tracción es de 10 Tn y a compresión es de 200 Tn. El procedimiento de adquisición de dimensiones geométricas y peso fue el mismo que en los anteriores ensayos. Para llevar a cabo la prueba de corte se elaboraron acoples metálicos para distribuir la carga de compresión como se muestra en la Figura 50; para adherir la placa a la muestra, se utilizó macilla plástica poliéster marca Sherwin Williams, la cual permite la unión de elementos y garantiza que la falla del material sea absolutamente por corte.

La configuración del ensayo se realizó como dicta la norma, asegurándose de que la línea de acción de la fuerza sea rectilínea y pase por la diagonal de la muestra, como se presenta en la Figura 50.

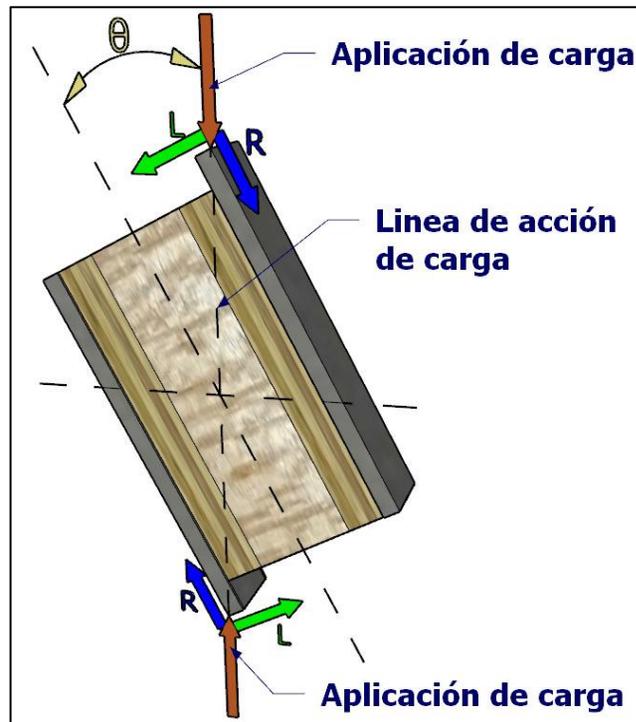


Figura 50 Distribución de carga en sentidos del prototipo de tablero estructural tipo sándwich y línea de acción de carga en la configuración del ensayo de corte

Como se puede ver en la Figura 50, la carga es aplicada verticalmente sobre las placas, pero estas cumplen su función, al dividir la carga en sus componentes, distribuyendo la carga en sentido longitudinal (L) y por otra parte en sentido radial (R). Para el caso del ensayo de corte la norma no especifica una velocidad de aplicación de carga, en base a esto se escogió la velocidad de 1 mm/min, para terminar la prueba en un rango de 3 y 6 min.

Para cada muestra ensayada a corte, se determinó el esfuerzo de corte y el módulo de cizallamiento ambos del núcleo. Para comprender de mejor manera el procedimiento del ensayo de corte, este se desarrolla a continuación.

- Se inspecciona la muestra para que no tenga fallas que interfieran en los resultados del ensayo y sus superficies se encuentren lisas, se coloca la codificación respectiva, para finalmente medir sus dimensiones y pesar cada muestra.
- En cuanto a la unión de los platos de carga metálicos (acoples metálicos), se los realizó mediante un método no intrusivo con la muestra, para esto se utilizó macilla plástica poliéster marca Sherwin Williams, garantizando la unión de los acoples con el espécimen, las proporciones de mezcla del material ligante fue el de la Sección 4.2.3.3.
- Después de dejar reposar la muestra junto con los acoples metálicos durante 24 horas, se procede a realizar el ensayo, aplicando carga sobre los acoples a una velocidad de 1 mm/min, hasta llegar a la falla del material.

4.2.5.4. Esfuerzo a corte del núcleo

La norma ASTM C273 especifica la Ecuación 9 para calcular el esfuerzo último a corte del núcleo del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, la cual se presenta a continuación,

$$\tau = \frac{P}{L * b} \quad (9)$$

donde τ es el esfuerzo a corte del núcleo (MPa), P es la carga aplicada al espécimen (N), L es la longitud (largo) del espécimen (mm) y b es el ancho del mismo (mm).

4.2.5.5. Módulo de corte del núcleo

El módulo de corte del núcleo describe cuan elástica es la forma de un material, esto quiere decir que al aplicar fuerzas cortantes (iguales y opuestas) a un cuerpo, este tienda a deformarse pero su volumen permanece constante (Bueche et al., 1991). Para el presente estudio se adoptó la Ecuación 10 de la norma ASTM C273, para el cálculo del módulo G esta se indica a continuación,

$$G = \frac{S * t}{L * b} \quad (10)$$

donde G es el módulo de corte del núcleo (MPa), S es la pendiente de la porción inicial de la curva carga vs desplazamiento ($\Delta P / \Delta u$), u es el desplazamiento de los platos de carga y t es el espesor del núcleo (mm). Las Ecuaciones 9 y 10, están íntimamente relacionadas, por lo que sus elementos son comunes entre ambas.

4.3. Resultados

4.3.1. Resultados de pruebas de densidad seca y contenido de humedad

4.3.1.1. Densidad seca y contenido de humedad de prototipo de tablero estructural sándwich

Los resultados y valores promedio obtenidos para cada prueba de densidad y contenido de humedad, por tipo de prototipo, se presentan en la Tabla 11 y 12.

Tabla 11

Valores de densidad y contenido de humedad de muestras de prototipo 1

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca	
P1.D.1	282,10	258,10	9,31
P1.D.2	280,60	254,90	10,00
P1.D.3	280,20	253,70	10,60
Promedio	281,00	255,60	10,00
CoV	0,0035	0,0088	0,0647

Tabla 12

Valores de densidad y contenido de humedad de muestras de prototipo 2

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca	
P2.D.1	272,60	246,30	10,00
P2.D.2	270,40	245,70	10,20
P2.D.3	266,00	241,40	10,70
Promedio	269,7	244,5	10,3
CoV	0,0126	0,0111	0,0350

Como se puede apreciar en la Tabla 11 y 12, el promedio de densidad al contenido de humedad es de 281 kg/m³ para el prototipo 1 y 269.7 kg/m³ para el prototipo 2. De

igual manera presenta el promedio de densidad seca al horno, teniendo así para el prototipo 1 un promedio de 255.6 kg/m³ y 244.5 kg/m³ para el prototipo 2. Las Tablas 11 y 12, muestran también valores promedio de contenido de humedad, determinando que el prototipo 1 tiene en promedio un 10 % de contenido de humedad, mientras que el prototipo 2 un promedio de 10.3 %. También se observa que el coeficiente de variación (CoV), no excede el 1.3% lo cual indica que no hay una dispersión de datos alta en referencia a su valor promedio.

4.3.1.2. Densidad y contenido de humedad de elementos constituyentes del prototipo de tablero estructural tipo sándwich

Los datos recopilados, los valores promedio de densidad y contenido de humedad, para cada tipo de muestra ensayada se presentan en las Tablas 13, 14, 15 y 16.

Tabla 13
Resultados de densidad y contenido de humedad para panel externo de melina (e=17 mm). Prototipo 1

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca al horno	
P.1.1	364,16	322,14	13,04
P.1.2	366,60	324,83	12,86
P.1.3	316,52	284,87	11,11
P.1.4	367,94	328,10	12,14
P.1.5	344,78	309,28	11,48
P.1.6	340,45	304,23	11,90
P.1.7	332,30	297,58	11,67
P.1.8	429,91	388,30	10,71
P.1.9	436,56	392,21	11,31
P.1.10	442,86	401,34	10,34
Promedio	374,21	335,29	11,66
CoV	0,123	0,127	0,074

Tabla 14

Resultados de densidad y contenido de humedad para panel externo de melina (e=34 mm). Prototipo 2

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca al horno	
P.2.1	416,82	373,98	11,46
P.2.2	437,09	393,26	11,14
P.2.3	435,62	393,69	10,65
P.2.4	422,10	384,04	9,91
P.2.5	437,10	397,89	9,86
P.2.6	437,96	396,19	10,54
P.2.7	444,26	401,61	10,62
P.2.8	419,16	377,48	11,04
P.2.9	430,77	386,74	11,38
P.2.10	420,13	383,30	9,61
Promedio	430,10	388,82	10,62
CoV	0,023	0,023	0,062

Tabla 15

Resultados de densidad y contenido de humedad para panel de núcleo de balsa (e=43 mm). Prototipo 1

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca al horno	
N.1.1	172,50	154,48	11,67
N.1.2	177,79	157,55	12,85
N.1.3	151,45	135,01	12,18
N.1.4	138,33	123,25	12,23
N.1.5	188,27	167,45	12,44
N.1.6	119,90	106,68	12,40
N.1.7	140,17	125,09	12,06
N.1.8	195,84	172,85	13,30
N.1.9	145,10	130,33	11,33
N.1.10	159,69	143,20	11,52
Promedio	158,90	141,59	12,20
CoV	0,153	0,150	0,049

Tabla 16

Resultados de densidad y contenido de humedad para panel de núcleo de balsa (e=88 mm). Prototipo 2

Muestra	Densidad (kg/m ³)		Contenido de humedad (%)
	Al contenido de humedad	Seca al horno	
N.2.1	131,71	116,49	13,06
N.2.2	118,44	103,91	13,98
N.2.3	110,85	98,19	12,89
N.2.4	181,62	160,90	12,88
N.2.5	146,54	130,45	12,34
N.2.6	199,29	179,49	11,03
N.2.7	119,85	105,47	13,64
N.2.8	206,88	186,06	11,19
N.2.9	111,43	98,81	12,78
N.2.10	120,14	107,52	11,74
Promedio	144,67	128,73	12,55
CoV	0,258	0,265	0,078

La Tabla 13, indica los resultados para el panel externo de melina del prototipo 1 de tablero estructural tipo sándwich, este elemento tiene un promedio de densidad al contenido de humedad de 374.21 kg/m³ y densidad seca de 335.29 kg/m³. Por otro lado, la Tabla 14, presenta los resultados para el panel externo de melina del prototipo 2, este elemento tiene un promedio de densidad al contenido de humedad de 430.10 kg/m³ y densidad seca de 388.82 kg/m³

En la Tabla 15 se tiene los resultados para el panel de núcleo de balsa del prototipo 1, este material tiene un promedio de densidad al contenido de humedad de 158.90 kg/m³ y densidad seca de 141.59 kg/m³. La Tabla 16 muestra que para el panel de núcleo de balsa del prototipo 2, el valor promedio de densidad al contenido de humedad es 144.67 kg/m³ y para densidad seca 128.73 kg/m³. En cuanto al contenido de humedad, las Tablas 13, 14, 15 y 16 presentan resultados promedio que varían entre 10.62 % y 12.55 %.

Como se puede observar no existe una gran variación, ya que los elementos antes de ser parte de cada prototipo fueron procesados industrialmente de la misma manera. Agregando a lo anterior tenemos el coeficiente de variación (CoV), el cual para el panel externo de melina en el prototipo 1 y 2 varía entre 0.023 y 0.066 respectivamente; en cuanto al (CoV) para el panel de núcleo de balsa en el prototipo 1 y 2 varía entre 0.150 y 0.265 respectivamente.

4.3.2. Resultados pruebas de compresión

4.3.2.1. Módulo de elasticidad y esfuerzo último a compresión

Los valores promedio de esfuerzo último a compresión y módulo de elasticidad (MOE_T), calculados en dirección tangencial (T) se presentan en la Tabla 17 y 18, para el prototipo 1 y para el prototipo 2 respectivamente.

Tabla 17

Resultados prueba de compresión en dirección tangencial (T). Prototipo 1

Muestra	Densidad kg/m³	MOE_T MPa	Esfuerzo último MPa
P1.C.1	263,65	5380,00	21,18
P1.C.2	263,99	5381,70	22,17
P1.C.3	263,22	5378,60	21,16
P1.C.4	262,31	5303,70	20,91
P1.C.5	265,97	5394,00	23,16
Promedio	263,83	5367,60	21,72
Cov	0,01	0,01	0,04

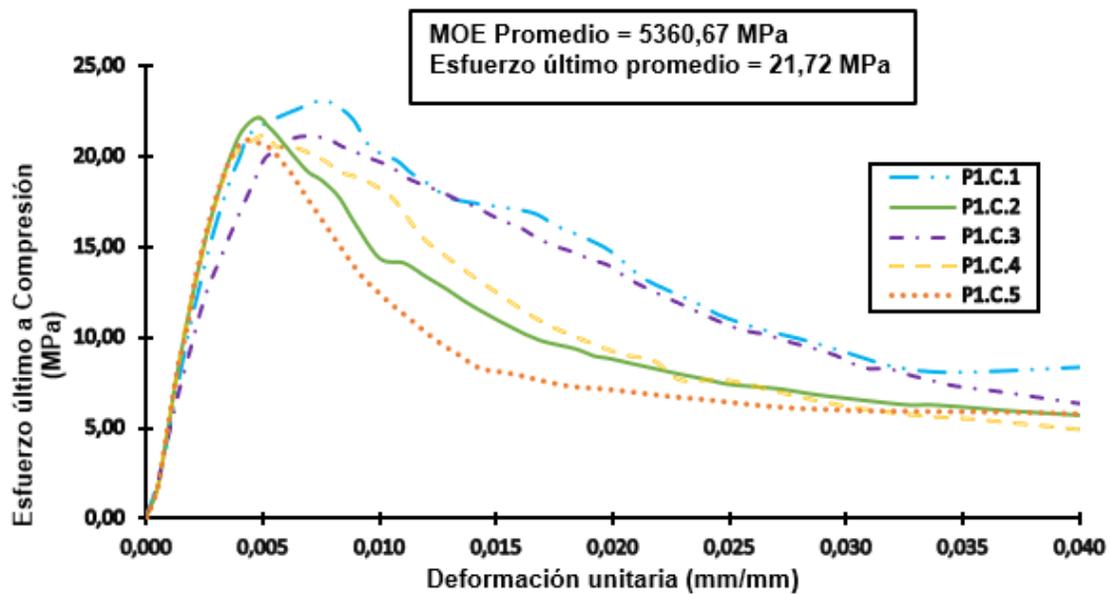
Tabla 18

Resultados prueba de compresión en dirección tangencial (T). Prototipo 2

Muestra	Densidad kg/m ³	MOE _T MPa	Esfuerzo último MPa
P2.C.1	264,32	4374,80	19,46
P2.C.2	274,31	4397,80	19,90
P2.C.3	256,91	4296,30	18,19
P2.C.4	262,16	4348,80	19,01
P2.C.5	259,56	4318,10	18,77
Promedio	263,45	4347,16	19,07
Cov	0,03	0,01	0,03

La Figura 51 traza el esfuerzo último a compresión en dirección tangencial (T) contra la deformación unitaria, para el prototipo 1 y 2 respectivamente. Estas gráficas son producto de los datos obtenidos en el ensayo de compresión.

(a)



CONTINÚA→

(b)

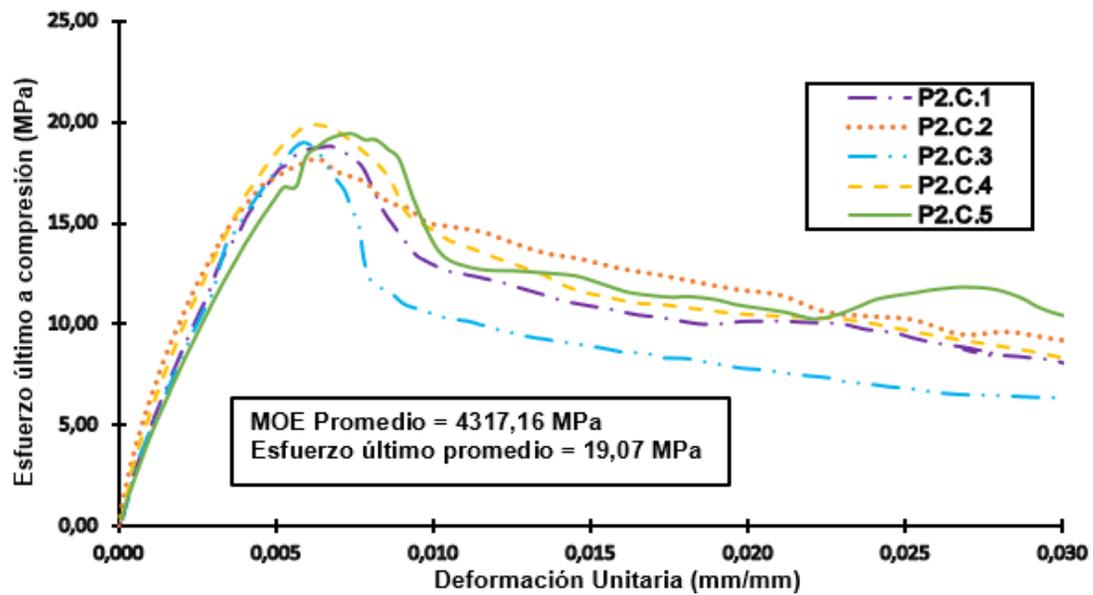


Figura 51 Esfuerzo último a compresión vs Deformación unitaria
(a) prototipo 1, (b) prototipo 2

En cuanto a la Figura 52 esta traza el esfuerzo último promedio de las muestras del prototipo 1 y 2 respectivamente, contra la densidad al 12% de humedad (M.C. 12%), encontrando así una buena correlación lineal ($R^2 > 0.87$) entre ambos valores.

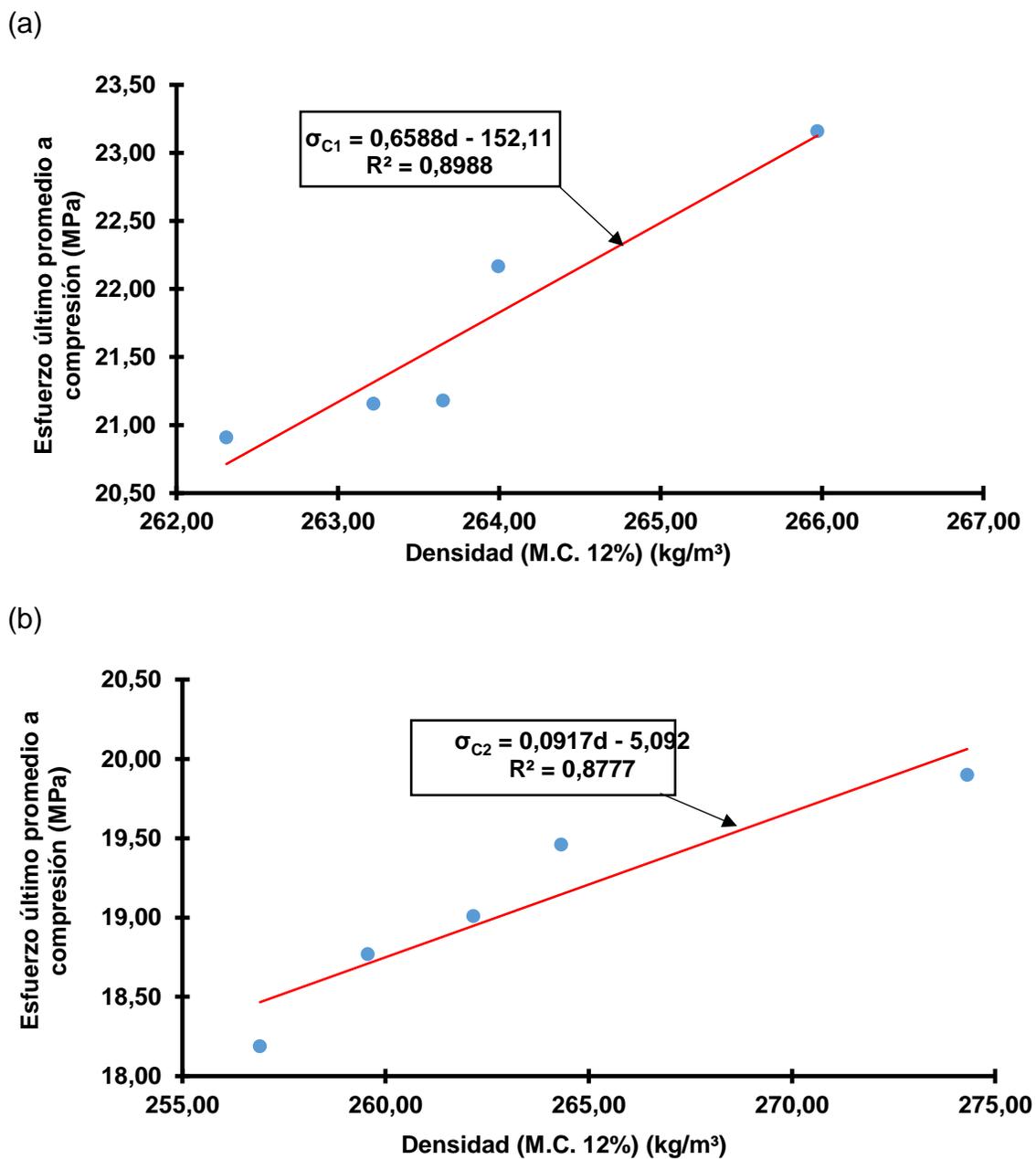
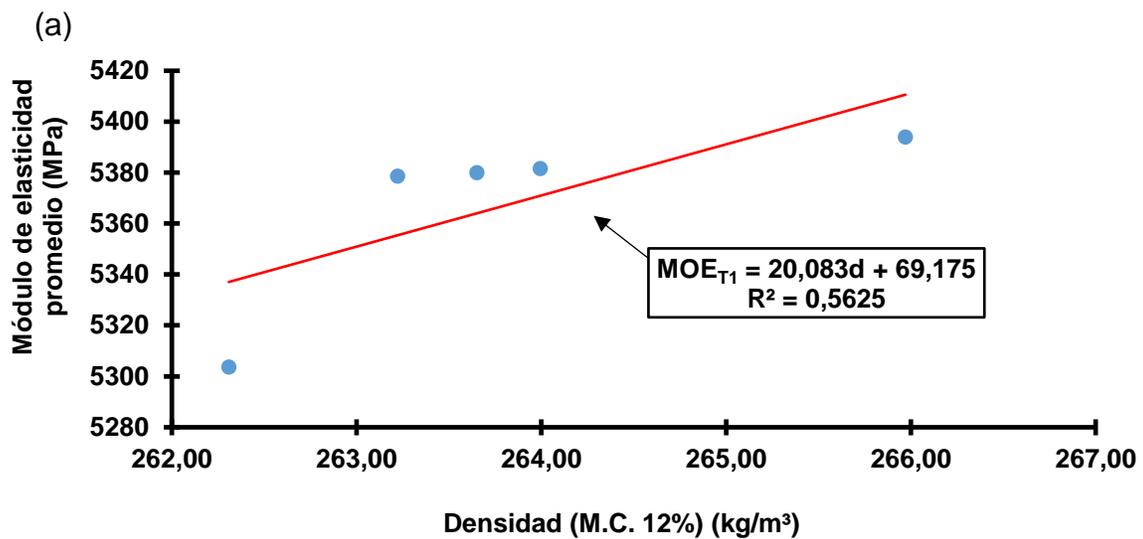


Figura 52 Esfuerzo último promedio a compresión vs Densidad (M.C. 12%) (kg/m³), (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

De igual manera en la Figura 53 se presentan los valores de módulo de elasticidad (MOE_T) frente a la densidad (M.C. 12%), para el prototipo 1 y 2 correspondientemente.

En este caso se encontró una correlación lineal un poco menor ($R^2 > 0.5625$) entre los valores de módulo de elasticidad y la densidad para el prototipo 1, caso contrario al prototipo 2 en el que se determinó una fuerte correlación lineal entre estos valores ($R^2 > 0.85$).



(b)

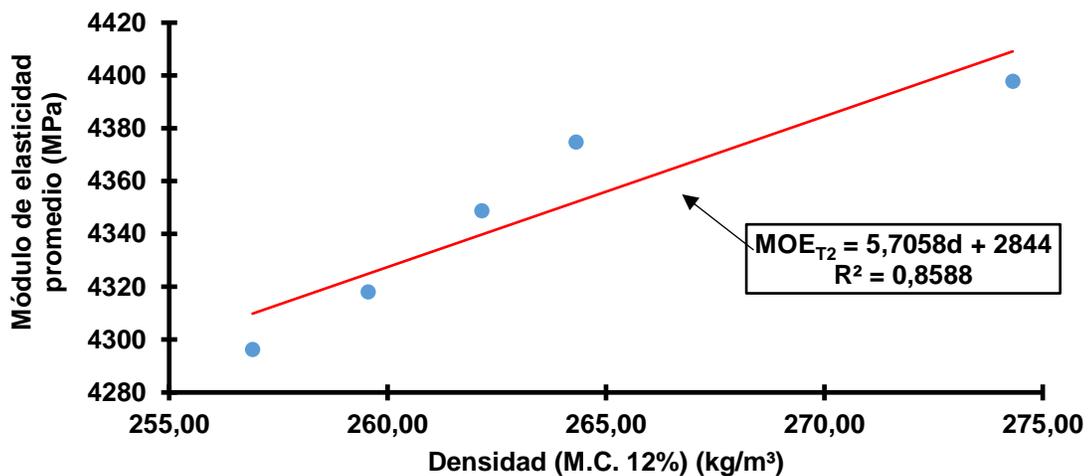


Figura 53 Módulo de elasticidad en dirección tangencial (T) vs densidad (M.C. 12%) (kg/m³), (a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

En los datos presentados en la Tabla 17 y 18 se realizó el sumario de resultados, de los cuales se puede resaltar que el promedio de módulo de elasticidad en dirección tangencial (T) para el prototipo 1 y 2 fue 5360.67 MPa y 4317.16 MPa respectivamente. Del mismo modo los valores promedio de esfuerzo último a compresión (T) fueron, para el prototipo 1 de 21.72 MPa y para el prototipo 2 de 19.07 MPa. Se puede apreciar que el coeficiente de variación (CoV) no es elevado lo cual indica que no hay dispersión de valores con respecto a su promedio.

Para establecer las ecuaciones que relacionen MOE_T con la densidad (M.C. 12%) y de la misma manera el esfuerzo último a compresión, se presentan las siguientes ecuaciones basadas en las regresiones lineales presentadas en la Figura 52 y 53.

$$\sigma_{C1} = 0.6588d - 152.11 \quad (11)$$

$$\sigma_{C2} = 0.0917d - 5.092 \quad (12)$$

$$MOE_{T1} = 20.083d + 69.175 \quad (13)$$

$$MOE_{T2} = 5.7058d + 69.175 \quad (14)$$

La Ecuación 11 y 13 son válidas para el prototipo 1, cuando su densidad (M.C. 12%) varía entre 262.31 y 265.97 kg/m³. De igual manera para el prototipo 2, la Ecuación 12 y 14 son válidas para valores de densidad (M.C. 12%) entre 259.56 y 274.31 kg/m³.

4.3.3. Resultados de pruebas de tracción

4.3.3.1. Esfuerzo último a tracción

El valor promedio de esfuerzo último a tracción, máxima fuerza de aplicación en dirección longitudinal (L) y los valores de esfuerzo último de cada probeta se presentan en la Tabla 19 y 20.

Tabla 19

Resultados prueba de tracción. Prototipo 1

Muestra	Densidad (kg/m³)	Max. Fuerza (Kg)	Esfuerzo último a tracción (MPa)
P1.T.1	280,09	112,54	0,45
P1.T.2	284,53	108,54	0,43
P1.T.3	279,91	111,56	0,44
P1.T.4	275,64	109,18	0,43
P1.T.5	277,13	103,20	0,41
Promedio	279,46	109,01	0,43
Cov	0,012	0,033	0,041

Tabla 20

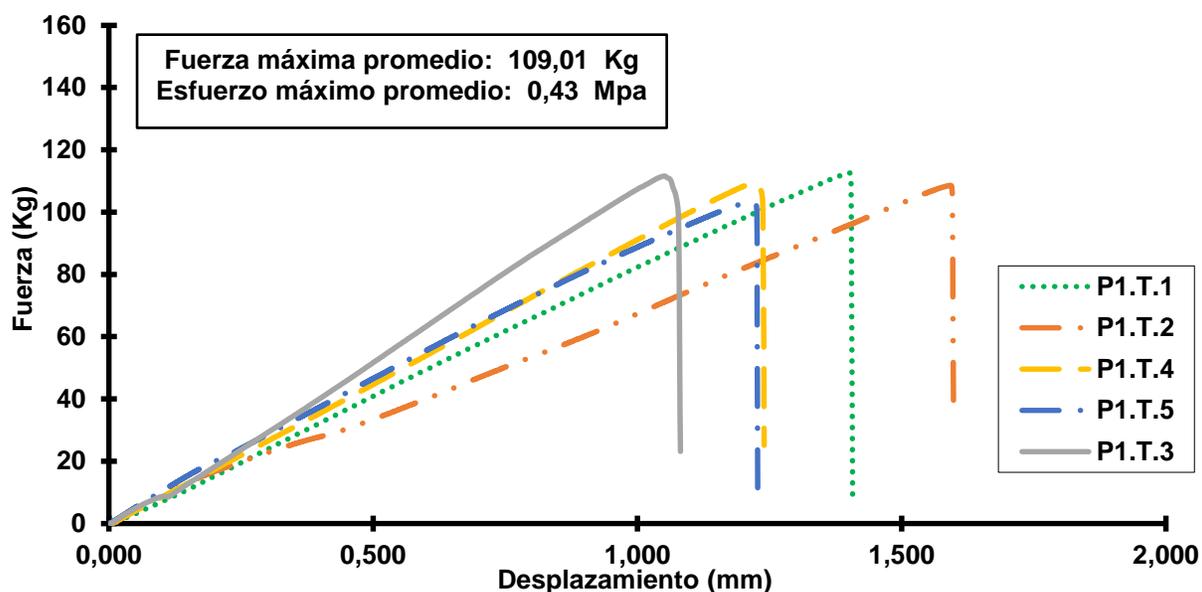
Resultados prueba de tracción. Prototipo 2

Muestra	Densidad (kg/m³)	Max. Fuerza (Kg)	Esfuerzo último a tracción (MPa)
P2.T.1	265,13	136,12	0,54
P2.T.2	263,11	132,73	0,53
P2.T.3	267,60	135,97	0,55
P2.T.4	261,07	130,64	0,51
P2.T.5	266,79	134,67	0,52
Promedio	264,74	134,02	0,53
Cov	0,010	0,017	0,026

Dentro de los valores que presenta la Tabla 19 y 20, tenemos la máxima fuerza promedio a tracción en dirección longitudinal (L), la cual para el prototipo 1 es de 109.01 (kgf) y para el prototipo 2 es 134.02 (kgf). De igual manera se indica el esfuerzo último promedio a tracción en la misma dirección, teniendo así para el prototipo 1 un valor de 0.43 MPa y para el prototipo 2, 0.53 MPa.

La Figura 54, presenta la gráfica Fuerza a tracción vs Desplazamiento, de todas las probetas ensayadas a tracción en dirección longitudinal (L) e indican los valores promedio tanto de fuerza máxima como de esfuerzo máximo. Estos datos fueron obtenidos en el laboratorio de ensayo de materiales, utilizando la carga aplicada y el desplazamiento del cabezal de la máquina de compresión.

(a)



CONTINÚA→

(b)

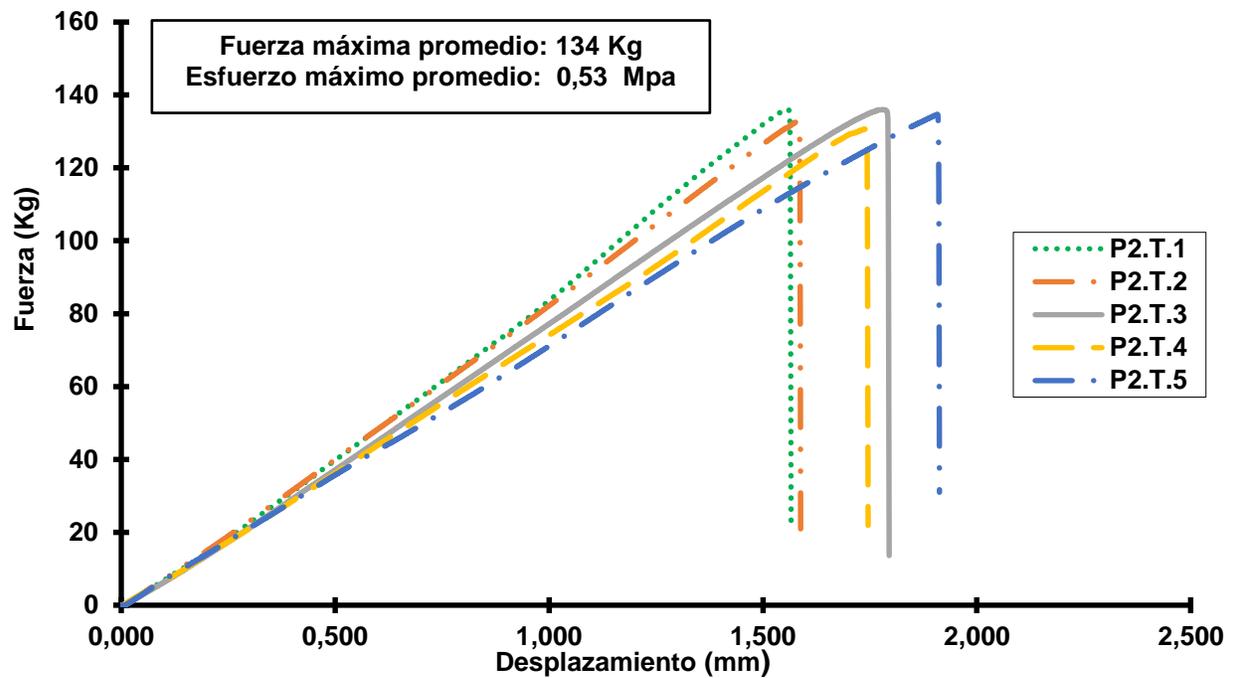


Figura 54 Gráfico Fuerza (kg) vs Desplazamiento (mm). (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

4.3.4. Resultados de pruebas de flexión

4.3.4.1. Esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de paneles externos

En la Tabla 21 y 22, se muestran los valores de esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión de paneles externos de cada muestra del prototipo 1 y prototipo 2, así como sus respectivos promedios y coeficientes de variación, producidos por el momento alrededor de la dirección radial (R).

Tabla 21

Valores de esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión paneles exteriores. Prototipo 1

Muestra	Densidad (M.C. 12 %) (kg/m³)	Fuerza Máxima (kg)	Esfuerzo último a corte del núcleo (MPa)	Esfuerzo de flexión de caras (MPa)
P1.F.1	288,69	3342,00	1,74	8,55
P1.F.2	275,38	2714,00	1,41	6,92
P1.F.3	281,34	3209,00	1,66	8,16
P1.F.4	283,98	3255,00	1,71	8,37
P1.F.5	278,76	3137,00	1,64	8,03
Promedio	281,63	3131,40	1,63	8,01
CoV	0,02	0,08	0,08	0,08

Tabla 22

Valores de esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión paneles exteriores. Prototipo 2

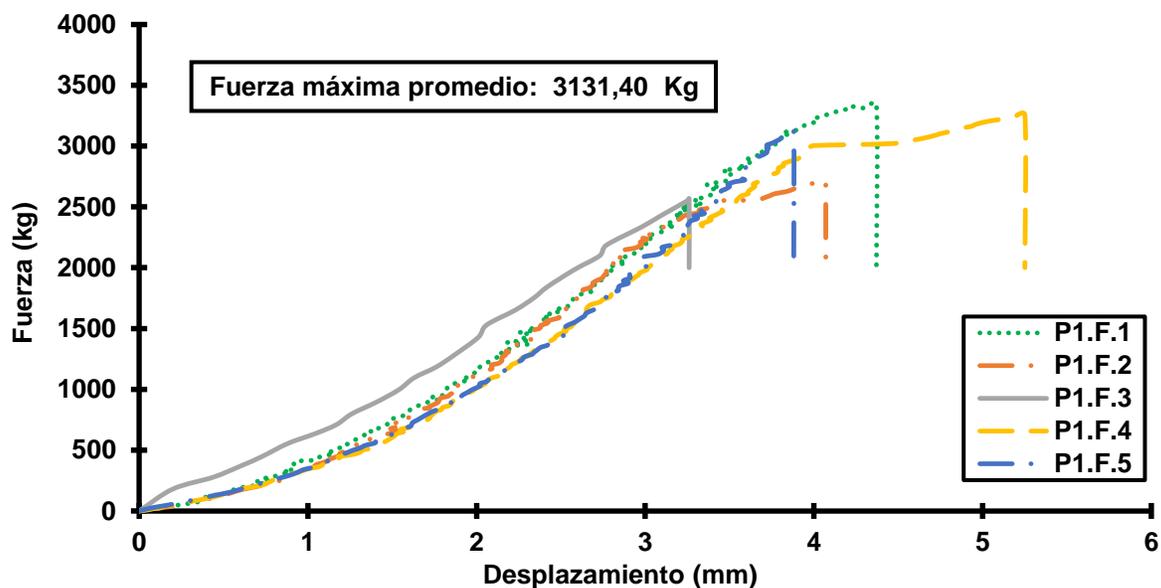
Muestra	Densidad (M.C. 12 %) (kg/m³)	Fuerza Máxima (kg)	Esfuerzo último a corte del núcleo (MPa)	Esfuerzo de flexión de caras (MPa)
P2.F.1	275,52	9926,79	1,34	6,89
P2.F.2	270,40	7035,08	0,95	4,89
P2.F.3	273,51	8264,89	1,10	5,64
P2.F.4	269,25	6769,18	0,90	4,64
P2.F.5	272,04	7633,36	1,02	5,21
Promedio	272,15	7925,86	1,06	5,45
CoV	0,01	0,16	0,16	0,16

En las Tablas 21 y 22, se obtiene un valor promedio de esfuerzo último a corte del núcleo de 1.63 (MPa) para las muestras del prototipo 1 y un valor menor de 1.06 (MPa) para las muestras del prototipo 2; el valor promedio del esfuerzo de flexión de paneles exteriores es de 8.01 (MPa) para las muestras del prototipo 1 y un valor de 5.45 (MPa) para las muestras del prototipo 2. Los coeficientes de variación obtenidos con los datos

de densidad (M.C. 12%) del prototipo 1, es de 0.02, mientras que para el prototipo 2, es de 0.01. Los coeficientes de variación del esfuerzo último a corte del núcleo y esfuerzo de flexión de paneles exteriores es de 0.08 para el prototipo 1, mientras que se obtuvo un coeficiente de variación de 0.16 para el prototipo 2.

La Figura 55 traza la fuerza a flexión producida por el momento alrededor de la dirección (R), en función del desplazamiento producido, para el prototipo 1 y el prototipo 2 respectivamente. Estas gráficas son producto de los datos obtenidos en el ensayo de flexión.

(a)



CONTINÚA→

(b)

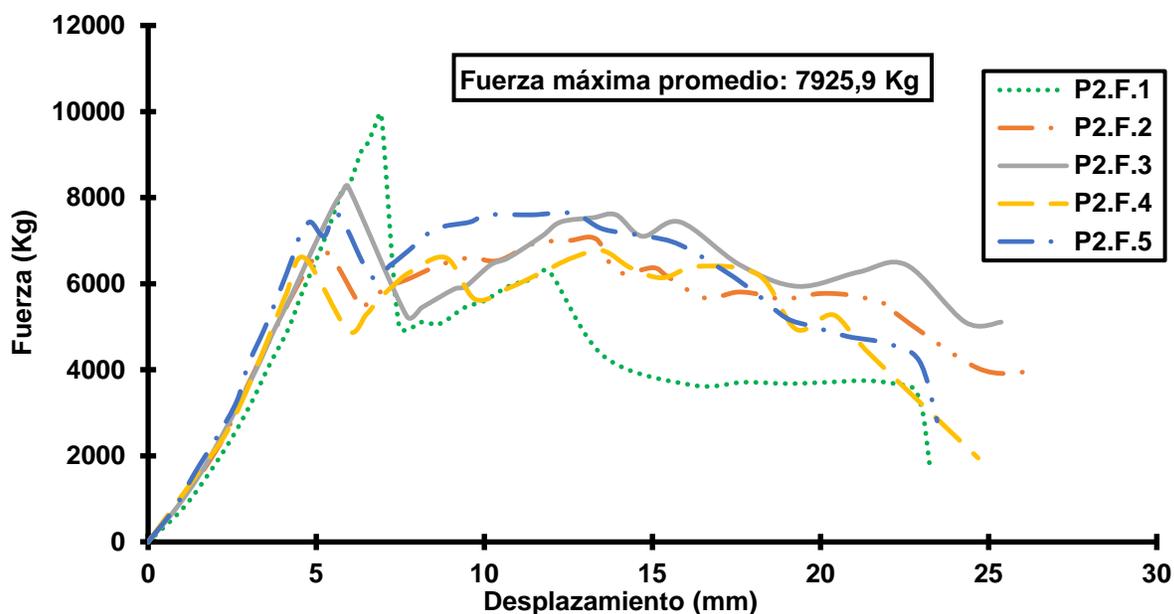
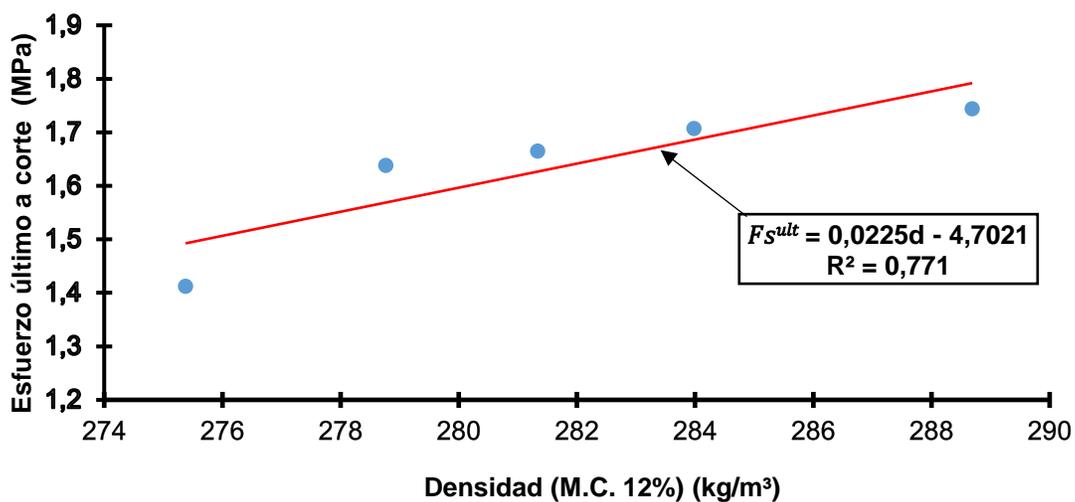


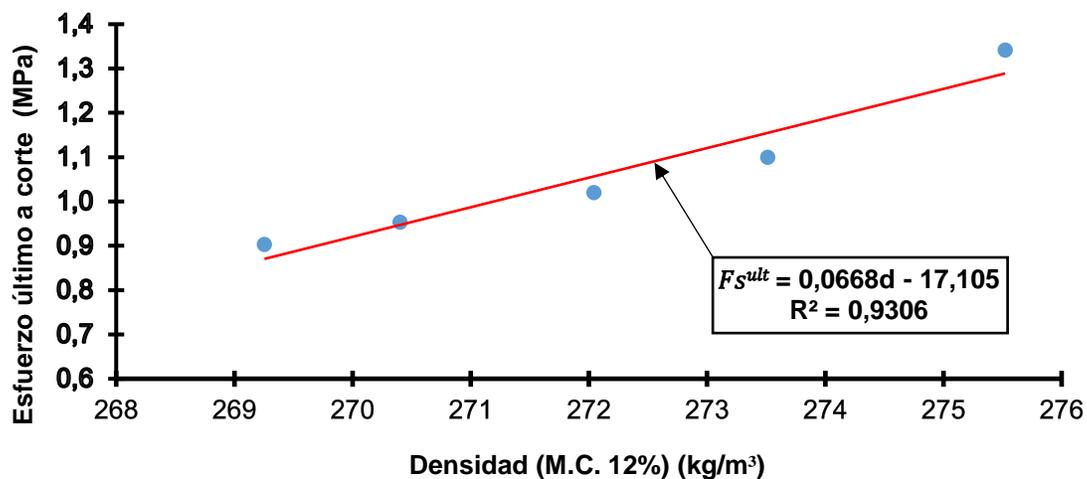
Figura 55 Fuerza aplicada vs desplazamiento, (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

En la Figura 55 se puede apreciar una semejanza en las gráficas individuales de cada muestra para ambos prototipos, también se presenta fuerza máxima promedio para cada prototipo siendo 3003 kg para el prototipo 1 y 7925.9 kg para el prototipo 2.

En la Figura 56 se graficó el esfuerzo último a corte del núcleo en función de la densidad de las muestras del prototipo 1, con una correlación lineal de ($R=0.77$) y de las muestras del prototipo 2, con una correlación lineal de ($R=0.93$).



(a)



(b)

Figura 56 Esfuerzo último a corte vs Densidad (M.C.12 %), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

Con base en las regresiones lineales presentadas en la Figura 56, se propone la Ecuación 15 y 16 para obtener el esfuerzo último a corte del núcleo producido por el momento alrededor de la dirección (R), en función de la densidad al contenido de humedad al 12% (kg/m³),

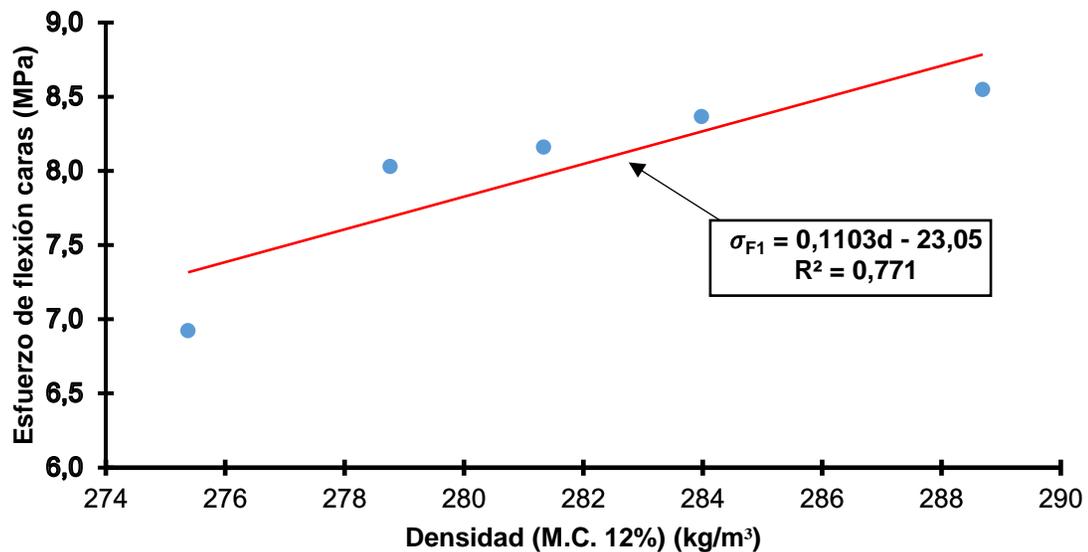
$$F_{s1}^{ult} = 0,0225d - 4.7021 \quad (15)$$

$$F_{s2}^{ult} = 0,0668d - 17,105 \quad (16)$$

donde F_s^{ult} es el esfuerzo último a corte del núcleo (MPa) y d es la densidad al contenido de humedad al 12%. La Ecuación 15 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 1 entre 275.37 y 288.69 kg/m^3 , mientras que para la Ecuación 16 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 2 entre 269.25 y 275.52 kg/m^3 .

La Figura 57, traza el esfuerzo de flexión de paneles exteriores en función de la densidad de las muestras del prototipo 1, con una correlación lineal de ($R^2=0.77$) y de las muestras del prototipo 2, con una correlación lineal de ($R^2=0.926$).

(a)



(b)

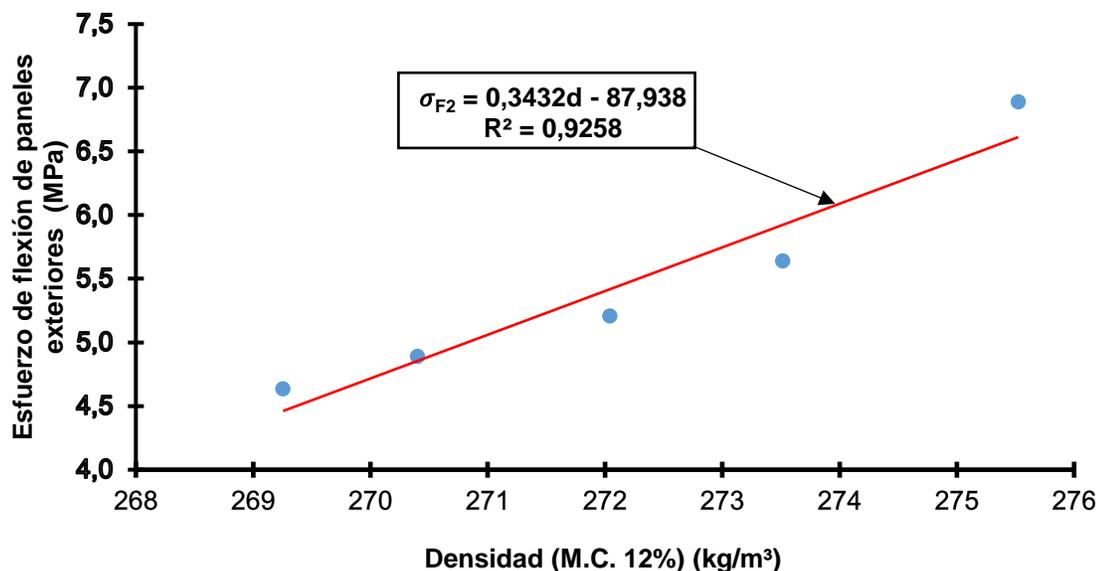


Figura 57 Esfuerzo de flexión de caras vs Densidad (M.C. 12 %),
(a) prototipo 1, (b) prototipo 2

Fundamentándose en las regresiones lineales presentadas en la Figura 57, se propone la Ecuación 17 y 18, para obtener el esfuerzo de flexión de paneles exteriores (MPa) producido por el momento alrededor de la dirección R, en función de la densidad (M.C.12 %) (kg/m^3),

$$\sigma_{F1} = 0,1103d - 23,05 \quad (17)$$

$$\sigma_{F2} = 0,3432d - 87,938 \quad (18)$$

donde σ_F es el esfuerzo a flexión de las caras (MPa) y d es la densidad al contenido de humedad al 12%. La Ecuación 17 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 1 entre 275.37 y 288.69 kg/m^3 , mientras que la Ecuación 18 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 2 entre 269.25 y 275.52 kg/m^3 .

4.3.5. Resultados de pruebas de corte

4.3.5.1. Esfuerzo a corte del núcleo y Módulo de corte del núcleo (G)

En las Tablas 23 y 24 se indican los valores de esfuerzo a corte del núcleo y módulo de corte del núcleo (G), de cada muestra del prototipo 1 y prototipo 2, así como su respectivos promedios y coeficientes de variación, la aplicación de carga se produjo de manera vertical, dividiéndose en dirección longitudinal (L) y tangencial (T)

Tabla 23

Valores de Esfuerzo último a corte y Módulo de corte del núcleo. Prototipo 1

Muestra	Densidad (M.C. 12 %) (kg/m ³)	Esfuerzo a corte del núcleo (MPa)	Módulo de corte del núcleo (MPa)
P1.S.1	288,66	1,38	130,21
P1.S.2	289,05	1,40	135,49
P1.S.3	309,78	1,45	142,98
P1.S.4	276,10	1,36	119,19
P1.S.5	254,24	1,21	115,16
Promedio	283,57	1,36	128,60
CoV	0,07	0,07	0,09

Tabla 24

Valores de Esfuerzo último a corte y Módulo de corte del núcleo. Prototipo 2

Muestra	Densidad (M.C. 12 %) (kg/m ³)	Esfuerzo a corte del núcleo (MPa)	Módulo de corte del núcleo (MPa)
P2.S.1	254,17	0,85	94,61
P2.S.2	266,96	1,05	112,49
P2.S.3	284,15	1,13	121,32
P2.S.4	283,57	1,15	128,51
P2.S.5	259,34	0,98	107,11
Promedio	269,64	1,03	112,81
CoV	0,05	0,12	0,12

De las Tablas 23 y 24, se obtiene un valor promedio de esfuerzo último a corte del núcleo de 1.36 (MPa) para las muestras del prototipo 1 y un valor menor de 1.03 (MPa) para las muestras del prototipo 2. El valor promedio del módulo de corte del núcleo es de 128.60 (MPa) para las muestras del prototipo 1 y un valor menor de 112.81 (MPa) para las muestras del prototipo 2. Los coeficientes de variación obtenidos con los datos de densidad (M.C. 12%) del prototipo 1, es de 0.07, mientras que para el prototipo 2, es de 0.05. El coeficiente de variación del esfuerzo último a corte del núcleo es de 0,07 para el prototipo 1, y de 0,12 para el prototipo 2. Por último, el coeficiente de variación para el módulo de corte del núcleo, es de 0.09 para el prototipo 1 y 0,12 para el prototipo 2. Como se puede apreciar, no existen coeficiente de variación mayores al 10 % lo cual indica que no hay dispersión de datos elevada.

En la Figura 58, se muestra el esfuerzo a corte del núcleo en dirección longitudinal (L) y tangencial (T) contra la deformación producida, para el prototipo 1 y el prototipo 2 respectivamente. Estas gráficas son producto de los datos obtenidos en el ensayo de corte.

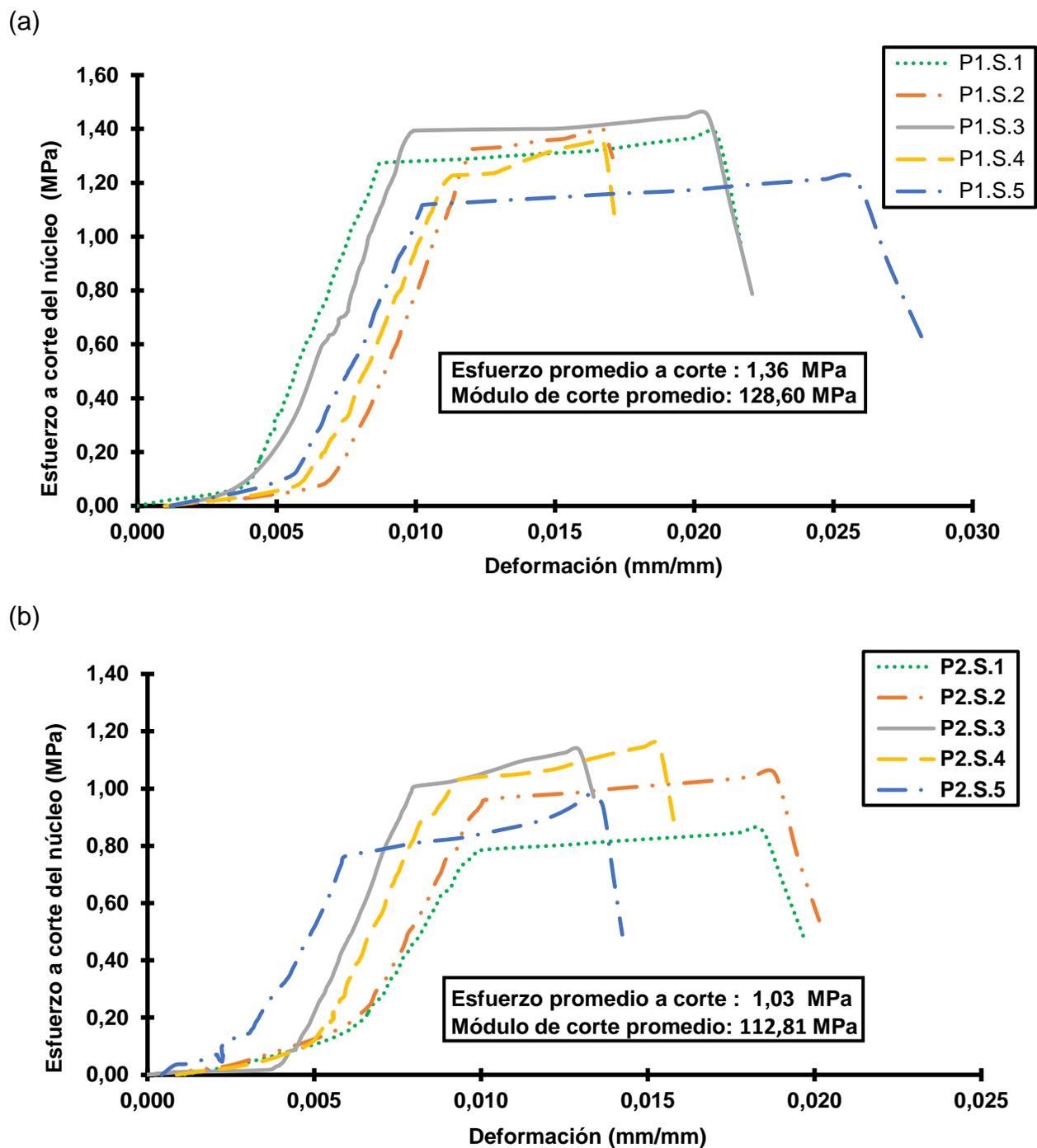
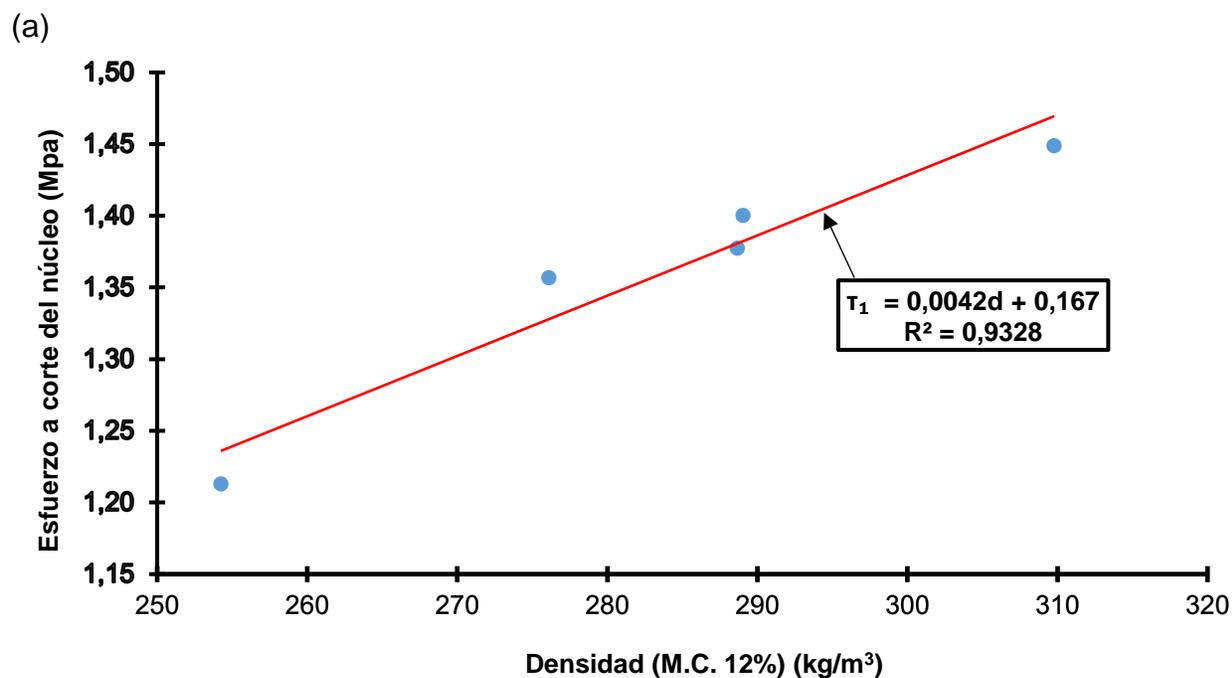


Figura 58 Esfuerzo a corte del núcleo vs Deformación,
(a) prototipo 1 y (b) prototipo 2

En la Figura 58 se puede observar que existe una semejanza en las gráficas individuales de cada muestra para ambos prototipos. También indica el esfuerzo último promedio a corte cuyo valor fue 1.36 MPa para el prototipo 1 y 1.03 MPa para el prototipo 2.

La Figura 59 presenta la gráfica de esfuerzo a corte del núcleo frente a la densidad (M.C. 12%) de las muestras del prototipo 1, con una fuerte correlación lineal de ($R^2=0.93$) y de las muestras del prototipo 2, de igual manera con una correlación lineal de ($R^2=0.90$).



CONTINÚA→

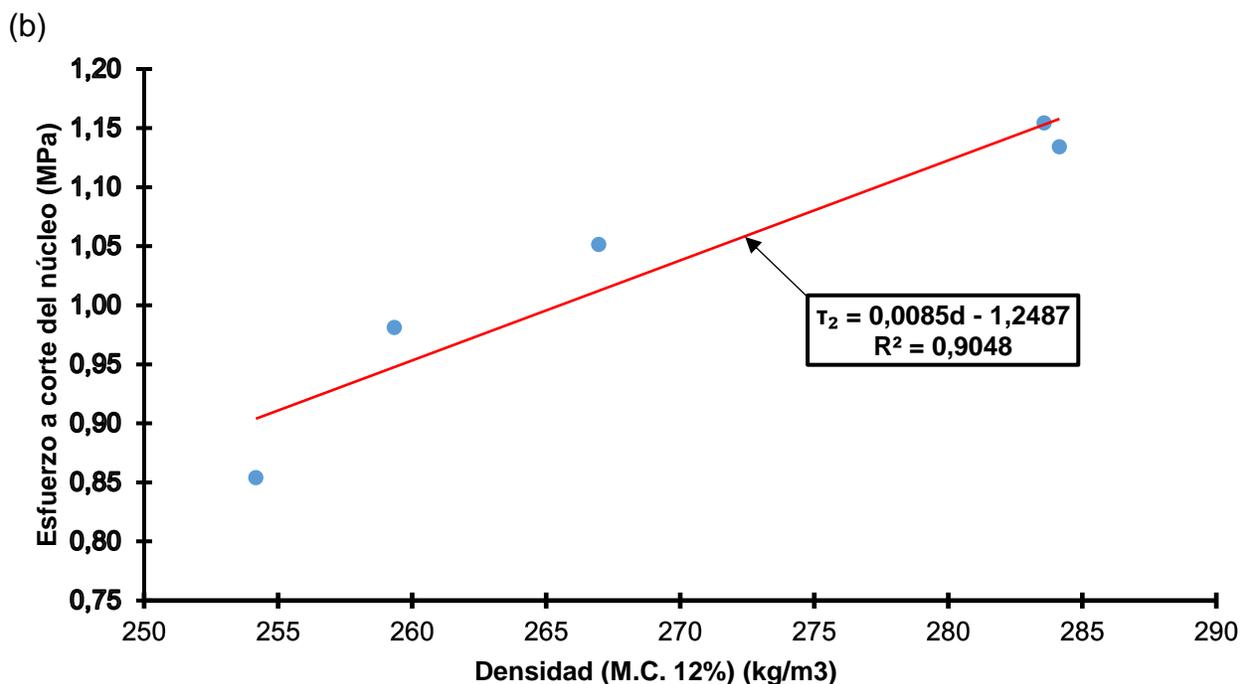


Figura 59 Esfuerzo a corte del núcleo vs Densidad (M.C. 12%), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

Con base en las regresiones lineales presentadas en la Figura 59, se propone la Ecuación 19 y 20 para obtener el esfuerzo último a corte del núcleo (MPa), producido por la fuerza de corte aplicada por las placas, en función de la densidad al 12 % de contenido de humedad (kg/m^3),

$$\tau_1 = 0,0042d + 0,167 \quad (19)$$

$$\tau_2 = 0,0085d - 1,2487 \quad (20)$$

donde τ es el esfuerzo a corte del núcleo (MPa) y d es la densidad (M.C. 12%). La Ecuación 19 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 1 entre 254.24 y 309.78 kg/m^3 , mientras que la Ecuación 20 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 2 entre 254.17 y 284.15 kg/m^3 .

En la Figura 60 se graficó el módulo de corte del núcleo contra la densidad (M.C. 12%) de las muestras del prototipo 1, con una correlación lineal de ($R^2=0.77$) y de las muestras del prototipo 2, con una correlación lineal fuerte de ($R^2=0.926$).

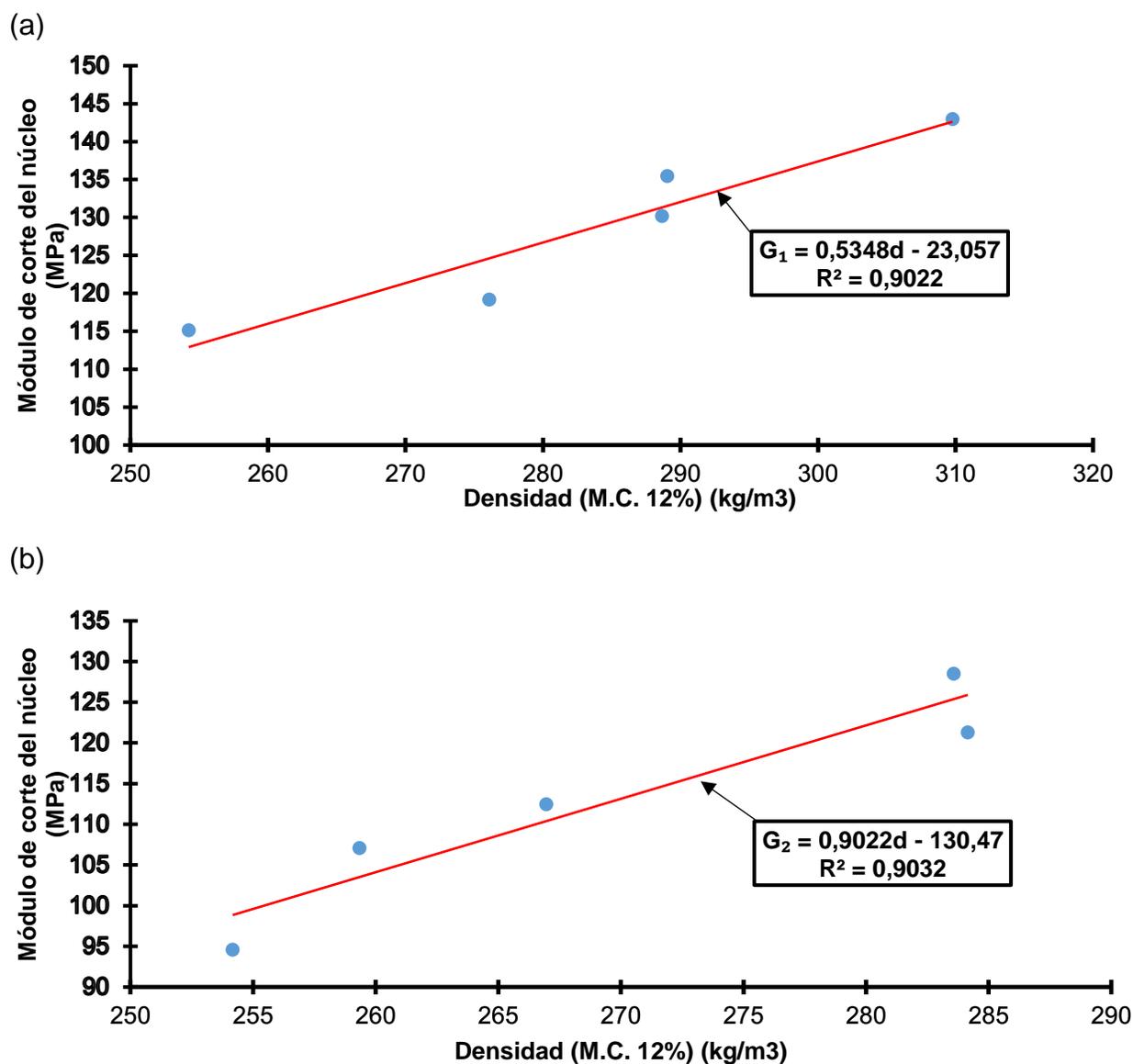


Figura 60 Módulo de corte (G) vs Densidad seca (M.C. 12%), (a) prototipo 1, (b) prototipo 2

Basándose en las regresiones lineales presentadas en la Figura 59, se propone la Ecuación 21 y 22 para obtener el módulo de corte (G) en (MPa), en función de la densidad (M.C. 12%) en (kg/m^3),

$$G_1 = 0.5348d - 23,057 \quad (21)$$

$$G_2 = 0.9022d - 130.47 \quad (22)$$

donde G es el módulo de corte en (MPa) y d es la densidad (M.C. 12%). La Ecuación 21 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 1 entre 254.24 y 309.78 kg/m^3 , mientras que para la Ecuación 22 es válida para densidades (M.C. 12%) del prototipo 2 entre 254.17 y 284.15 kg/m^3 .

4.4. Discusión de resultados

- Los valores promedio de densidad al contenido de humedad y densidad seca al horno de los paneles exteriores del prototipo 1, son de 374.21 kg/m^3 y 335.29 kg/m^3 respectivamente, también se pudo constatar que el panel exterior para el prototipo 1 tenía un promedio de 11.66 % de contenido de humedad. Mientras que los valores promedio de densidad al contenido de humedad y densidad seca al horno de los paneles exteriores del prototipo 2, son de 430.1 kg/m^3 y 388.82 kg/m^3 respectivamente, y poseen un contenido de humedad promedio de 10.62%. Se puede apreciar que la densidad de los paneles exteriores del prototipo 1 es mayor que la densidad de los paneles exteriores del prototipo 2, esto se debe a que, el prototipo 1 tiene 7 láminas cruzadas de melina con 6 capas de urea- formaldehído, mientras que el prototipo 2 tiene 14 láminas cruzadas de melina (el doble de las

láminas del prototipo 1) y 13 capas de urea- formaldehído (mayor al doble que las capas en el prototipo 1), por lo que aumenta su densidad. Los valores de humedad y densidad (M.C. 12%) obtenida de los paneles exteriores de ambos prototipos, se encuentran en el rango de contenido de humedad y densidad que presenta la Tabla 3 de propiedades físicas de la melina en la Sección (3.1.2.2.).

- Se puede apreciar que los valores de humedad de los paneles exteriores, tanto del prototipo 1 como del prototipo 2 son cercanos al 12% de humedad, el cual es valor máximo de humedad aceptable para el uso de madera procesada.
- Los valores promedio de densidad al contenido de humedad y densidad seca del panel de núcleo de balsa del prototipo 1, son de 158.90 kg/m^3 y 141.59 kg/m^3 respectivamente, el contenido de humedad promedio en el prototipo 1 fue de 12.20 %. Mientras que valores promedio de densidad al contenido de humedad y densidad seca del panel de núcleo de balsa del prototipo 2, son de 144.67 kg/m^3 y 128.73 kg/m^3 respectivamente, con un contenido de humedad de 12.55%. Se puede ver que la densidad del núcleo del prototipo 1 es mayor que la densidad del núcleo del prototipo 2. Los valores de humedad y densidad (M.C. 12%) obtenida del panel de núcleo de balsa de ambos prototipos se encuentra en el rango de contenido de humedad y densidad presentado en la Tabla 2 de propiedades físicas y mecánicas de la balsa de la Sección (3.1.1.2.).
- Los resultados obtenidos en el ensayo de densidad del prototipo compuesto, indican que el prototipo 1 posee una densidad de 281 kg/m^3 , la cual es mayor que la del prototipo 2 que posee una densidad de 269.7 kg/m^3 , pese a tener mayores

dimensiones. El prototipo 1 tiene una mayor densidad ya que tiene un porcentaje total de panel exterior de melina de 43.93% respecto a la totalidad del espesor del prototipo, mientras que el prototipo 2 posee un porcentaje total de panel exterior de melina de 43.59%, la cual es menor que el prototipo 1, esto se debe a que los paneles exteriores tienen mayor densidad que el panel de núcleo, por lo tanto, ante mayor porcentaje de elemento externo respecto a su totalidad, el prototipo tendrá una mayor densidad.

- En el ensayo a compresión en el sentido tangencial (T), se obtuvo un módulo de elasticidad (MOE_T) promedio de 5367.60 MPa y 4347.16 MPa del prototipo 1 y prototipo 2 respectivamente, esto indica que el prototipo 2 posee una mayor elasticidad, se conoce que el prototipo 2 está conformado por un mayor espesor de balsa, la cual proporciona la flexibilidad del tablero estructural tipo sándwich e influye que el MOE_T del prototipo se encuentre en el rango de MOE de balsa de los autores presentados en la Sección (3.1.1.2.).
- El esfuerzo último obtenido en el ensayo a compresión presentó valores promedios de 21.72 MPa y 19.07 MPa del prototipo 1 y 2 respectivamente, esto indica que el prototipo 1 posee una mayor rigidez respecto al prototipo 2, esto se debe a que la relación de rigidez de un material es directamente proporcional al módulo de elasticidad (MOE) e inversamente proporcional a su elasticidad.
- En el ensayo a compresión se observó un comportamiento dúctil en ambos prototipos, puesto que después de llegar a su esfuerzo último, siguen soportando

una carga remanente durante un periodo prolongado, lo que significa que no hay una falla instantánea del tablero estructural tipo sándwich.

- Se presentó una clara tendencia creciente del esfuerzo último a compresión y del MOE en función de su densidad (M.C. 12%).
- Los valores promedio de esfuerzos últimos a tracción son de 0,43 MPa y 0,53 MPa del prototipo 1 y 2 respectivamente. Estos valores son similares, ya que en el ensayo a tracción se evidenció que las fallas se produjeron por el ligante utilizado entre las diferentes capas que conforman el tablero estructural tipo sándwich. El esfuerzo último a tracción no tiene relación directa con la densidad de cada muestra.
- Con el ensayo a flexión se obtuvieron valores promedios de esfuerzo último a corte del núcleo de 1,63 MPa y 1,06 MPa del prototipo 1 y 2 correspondiente. Los valores promedio de esfuerzos de flexión paneles exteriores son de 8.01 MPa y 5.45 MPa del prototipo 1 y 2 respectivamente. En ambas propiedades obtenidas se evidencia valores mayores en el prototipo 1, ya que posee una mayor rigidez. En el desarrollo del ensayo, se observó una falla instantánea posterior a resistir el esfuerzo máximo por parte del prototipo 1, mientras que el prototipo 2 que posee mayores espesores tanto de panel de núcleo como de paneles exteriores, presentó un aumento de ductilidad comparado con el prototipo 1. El prototipo 2 después de llegar al máximo esfuerzo, sigue soportando una carga remanente durante un tiempo considerable antes de su falla total.

- Los resultados obtenidos del ensayo de flexión presentaron una clara tendencia creciente del esfuerzo último a corte del núcleo y del esfuerzo de flexión de panels exteriores, en función de su densidad (M.C.12%).
- Como resultados del ensayo de corte se obtuvieron valores promedios del esfuerzo a corte del núcleo de 1.36 MPa y 1.03 MPa del prototipo 1 y 2 respectivamente. Se comparó los resultados del esfuerzo a corte del núcleo, al aplicar las normas ASTM C393 (ensayo de flexión) y ASTM C273 (ensayo de corte), los cuales se aproximan, pero no son iguales, como indica ASTM C273 [3.2], que dichos valores obtenidos en la prueba de flexión son valores aproximados a los valores reales que se obtiene en el ensayo de corte; presentando una diferencia de 19.85% en el prototipo 1 y 2.91% en el prototipo 2.
- Los valores promedio del módulo de corte del núcleo que se obtuvo en el ensayo de corte, son de 128.60 MPa y 112.81 MPa, para el prototipo 1 y 2 correspondientemente. El comportamiento del prototipo 1 ante fuerzas cortantes, provocó un módulo de corte del núcleo mayor que el del prototipo 2, debido a que el prototipo 1 presenta un mayor cambio de forma cuando se le aplican esfuerzos cortantes, ya que su inercia es menor por tener una menor sección transversal.
- Los valores de esfuerzo de corte y módulo de corte del núcleo, se encuentran en el rango de la caracterización mecánica de balsa presentada en la Tabla 3 de la Sección 3.1.1.2, esto se debe a que en el prototipo de tablero estructural tipo sándwich el elemento que resiste las sollicitaciones a corte específicamente es el

panel de núcleo de balsa, pues la función de las caras es solamente transmitir la fuerza.

- Se verificó el valor del módulo de corte del núcleo con estudios previos desarrollados con madera de balsa de la provincia de Quevedo, realizada por (Moncayo Galárraga, 2017), en la cual se pudo interpolar los valores de densidad del panel de núcleo de balsa que varía entre 110.85 y 206.88 kg/m³, estos fueron usados para determinar los valores de MOE que se encuentran entre 1359.94 y 2796.64 MPa. Para determinar el rango aceptable del módulo de corte del núcleo (G) se utilizó los valores de MOE anteriormente descritos, siendo el inicio de la variación del rango MOE/20 con 67.99 y 139.83 MPa hasta finalizar con un valor MOE/16 con 84.99 y 174.79 MPa, para el prototipo 1 y 2 respectivamente con lo que se verifica que el módulo (G) obtenido para el prototipo 1 y 2 se encuentra dentro de este rango aceptable.
- Se presentó una clara tendencia creciente del esfuerzo a corte y del Módulo de corte del núcleo (G), en función de su densidad (M.C. 12%).
- Las fallas que presentaron los prototipos en los ensayos realizados, son modos de falla aceptados por cada norma aplicada, como se muestran en los Anexos (1-6), lo cual comprueba que las dimensiones de las probetas y la metodología usada en cada ensayo fueron correctas.

CAPITULO V

5. MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL

5.1. Introducción

Los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich son creados con el propósito de ser una alternativa para materiales de construcción estructural. Por lo tanto, son destinados a soportar cargas externas altas, las mismas que dependen del rendimiento estructural del material que se fundamenta en la relación de forma – estructura – función que caracteriza cada material del tablero estructural tipo sándwich.

Como se indicó en los capítulos anteriores las propiedades de los tableros tienen diferentes distribuciones y por esa razón se necesita un método de validación de datos experimentales como es la modelación en elementos finitos. Para lograr el objetivo se realizaron un total de 36 modelos en 3D de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) entre compresión y flexión. Por medio del Análisis Finito de Elementos en 3D (FEA, por sus siglas en inglés), método numérico para analizar esfuerzos y deformaciones bajo cualquier carga y geometría dada.

Se estudiaron los resultados obtenidos a partir de la modelación de elementos finitos, que inicio con la geometría del tablero, la cual se modelo teniendo en cuenta la norma que rige cada ensayo, es decir, para el modelo a compresión se adoptó las medidas establecidas en la norma ASTM C364 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions; para el modelo de flexión se siguió las

medidas establecidas en la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.

Se realizó análisis estáticos no lineales de elementos finitos aplicando diferentes tipos de carga para cada tipo de tablero, cada tipo de espesor y para cada prueba específica. Bajo estas condiciones de carga, se estudió la biomecánica del tablero en términos de la progresión de la falla de compresión y flexión. Asimismo, se llevaron a cabo análisis paramétricos para evaluar la influencia de las orientaciones de los materiales del tablero y su densidad, sobre su respuesta mecánica ante esfuerzos de compresión y flexión.

5.2. Materiales y métodos

En las secciones que se presentan a continuación se analiza la metodología de elementos finitos utilizada para elaborar el modelo 3D y los análisis de elementos finitos realizados para lograr con éxito los objetivos de la investigación en este capítulo.

5.2.1. Modelamiento de elementos finitos

El método de elementos finitos es una de las herramientas más utilizadas en la solución de problemas de ingeniería, mediante este método se logra obtener respuestas fiables y rápidas, además de soluciones óptimas para problemas de difícil resolución mediante otros métodos (Manriquez, 2002).

5.2.1.1. Detalles del modelo

Los modelos estructurales de madera han sido útiles para estimar la probabilidad de falla de los tableros. Por tal razón, en el presente estudio se elaboró un modelo de

elementos finitos en 3D de los especímenes de prueba, utilizando el software comercial de elementos finitos LS – DYNA y LS – PREPOST.

Para la elaboración de los modelos de elementos finitos se establecieron las siguientes suposiciones del modelo: (i) los materiales de los paneles externos y del panel de núcleo tienen un comportamiento linealmente elástico, (ii) el esfuerzo de corte que se produce en el panel de núcleo es constante a través de su espesor y (iii) no presenta delaminación entre panel de núcleo y paneles externos.

5.2.1.1.1. Propiedades geométricas y condiciones de borde

La delimitación de las condiciones de borde se debe realizar considerando los parámetros utilizados al momento de realizar las pruebas en laboratorio. El modelo de elementos finitos para compresión tiene semejanza a un muro en construcción ya que estará completamente apoyado en la parte inferior mientras se le aplica carga axialmente. Para simular completamente la compresión uniaxial del modelo es necesario aplicar la carga en una de sus caras e impedir el desplazamiento en la cara opuesta (véase Figura 61) (I. Castro & Alejandro, 2012).

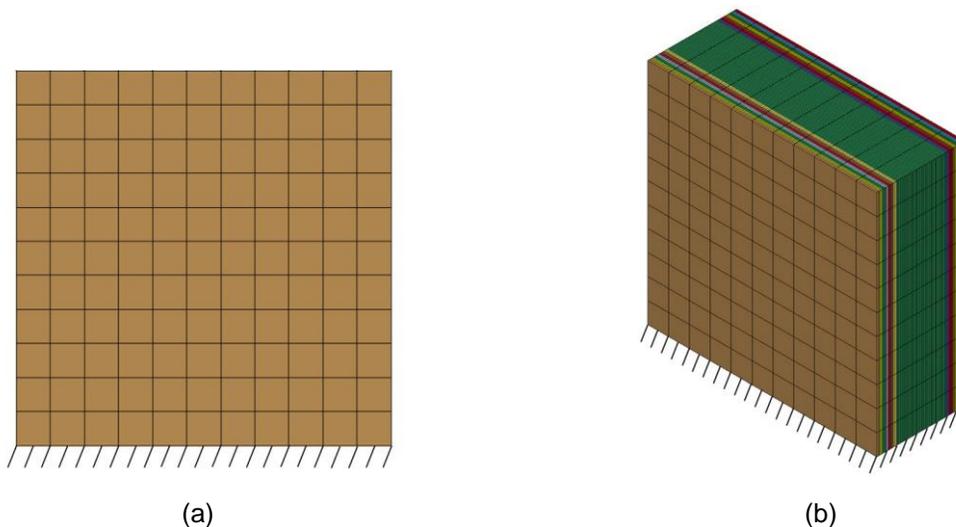


Figura 61 Modelo de prototipo de tablero estructural tipo sándwich elaborado bajo modelación de elementos finitos, para el análisis bajo el modo mecánico de compresión uniaxial. a) Vista Lateral, b) Vista Isométrica

Para el modelo destinado a simular la prueba de flexión se determinó su condición de borde igual al de la prueba realizada en laboratorio, es decir, solo se limitó la rotación alrededor del eje perpendicular a la aplicación de carga, lo que implica que este modelo tuvo 2 grados de libertad (véase Figura 62).

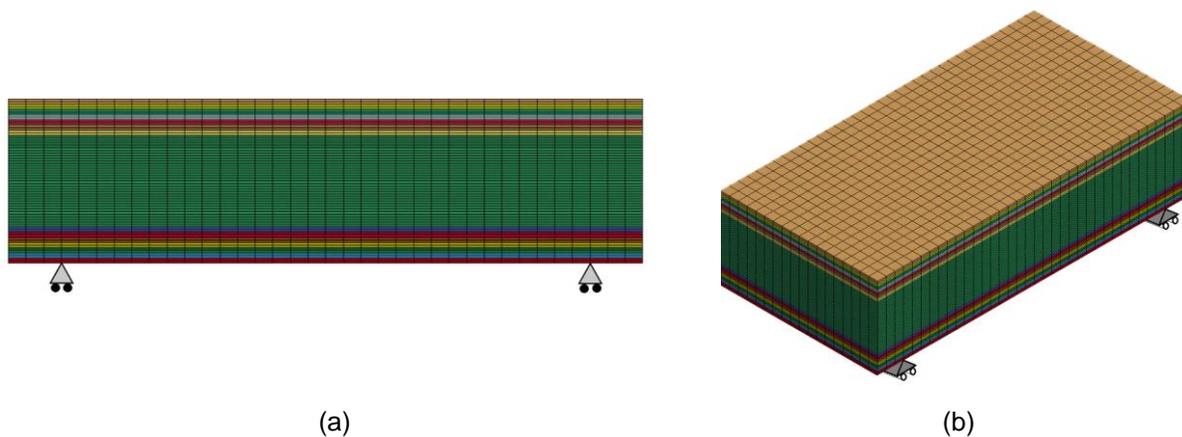


Figura 62 Modelo de prototipo de tablero estructural tipo sándwich elaborado bajo modelación de elementos finitos, para el análisis bajo el modo mecánico de flexión en 4 puntos. a) Vista Lateral, b) Vista Isométrica

En cuanto a la geometría de cada modelo, se la determinó en base al tamaño de muestras exigidas por las normas (ASTM) para cada ensayo, en el caso de compresión, las dimensiones de las muestras se determinaron según la norma ASTM C364 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions en la sección 8 Sampling and Test Specimens. Para el caso de las muestras de flexión se utilizó la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure en la sección 8 Sampling and Test specimen.

También se colocó la orientación de fibras dentro de la estructura del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, esto se refiere a que las fibras modeladas de paneles externos de melina se mantuvieron bidireccionales y las fibras del panel de núcleo de balsa se modelaron perpendiculares a los paneles de melina. A continuación, la Tabla 25 muestra las dimensiones de los modelos de elementos finitos elaborados.

Tabla 25

Dimensiones de modelos de elementos finitos

Modelo	Dimensiones (mm)		
	Largo	Ancho	Espesor
P1.C	200,0	200,0	77,8
P2.C	300,0	300,0	156,0
P1.F	300,0	150,0	77,8
P2.F	600,0	300,0	156,0

5.2.1.1.2. Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en la modelación de elementos finitos se derivaron de los resultados presentados en el capítulo 4, las propiedades físicas provinieron de las pruebas de densidad y contenido de humedad,

mientras que las propiedades mecánicas se obtuvieron de las pruebas de compresión, flexión, tracción y corte; estos valores se utilizaron para reflejar el comportamiento del prototipo de tablero estructural bajo los modos mecánicos ensayados. Las propiedades que no se determinaron en el capítulo 4 se tomaron de la publicación “Wood handbook: wood as an engineering material” publicado por el Departamento de Servicio Forestal de Agricultura de los Estados

5.2.1.1.3. Técnica de modelamiento de elementos finitos

Para integrar la forma de los prototipos tableros estructurales tipo sándwich, su estructura, las propiedades de cada material y las solicitaciones de carga para cada ensayo, se utilizó el programa LS – DYNA, cuyo propósito es de uso general para cualquier tipo de modelación y específicamente se centra en el análisis no lineal de estructuras.

A su vez LS-DYNA se complementa con LS-Prepost (Pre procesador y Post procesador), el cual es una herramienta interactiva en la que se preparan los modelos de entrada a LS-DYNA y presenta de igual manera los datos procesados.

Se utilizó la técnica de modelado de elementos finitos en 3D para los prototipos, ya que presentó resultados precisos al evaluar desplazamientos y esfuerzos en el material. El comportamiento anisotrópico del material y las diferentes direcciones en las que están dadas sus propiedades se capturaron en el modelo de elementos finitos con LS- Prepost con alta eficacia.

5.2.1.1.3.1. Discretización del dominio

Para iniciar la modelación del prototipo de tablero estructural tipo sándwich se tiene que discretizar su estructura, es decir, dividir el tablero continuo en una serie de elementos, en los que su tamaño y orden estarán anticipadamente definidos (Manriquez, 2002). Todas estas divisiones generan elementos denominados “elementos finitos”, los mismos que se conectan entre sí mediante nodos que se ubican generalmente en la frontera de cada uno. Según Manriquez (2002) estas divisiones en el elemento del tablero continuo generan elementos finitos y nodos, que a su vez generan una malla, la cual representará la geometría del tablero lo más aproximada a la realidad.

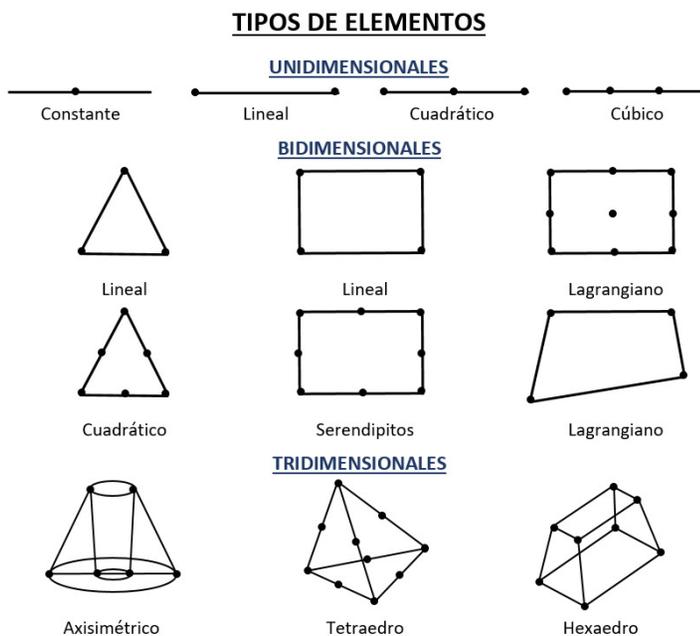
Por lo tanto, se generó una malla de elementos regular para que los nodos tengan una distribución uniforme y que de esta manera la aplicación de la carga no sea distinta a la aplicación ejecutada en laboratorio. El número de divisiones que se realizaron en la modelación se probaron hasta determinar cuál sería el mallado óptimo, en cuestión de tiempo de procesamiento y resultados.

5.2.1.1.3.2. Elección del elemento

El tipo de elemento a utilizar en la modelación debe ser seleccionado acorde al problema que se requiere solucionar. Manriquez (2002) presenta una clasificación de elementos que se pueden utilizar en la modelación los cuales son; (i) elementos monodimensionales: constituidos por líneas y vigas, (ii) elementos bidimensionales: estos pueden ser triangulares (lineales o cuadráticos) o rectangulares (lineales, lagranianos o

serndíptos) y (iii) elementos tridimensionales: que pueden ser (axisimétricos, paralelepípedos y hexaedros) (véase Figura 63 (a)).

(a)



(b)

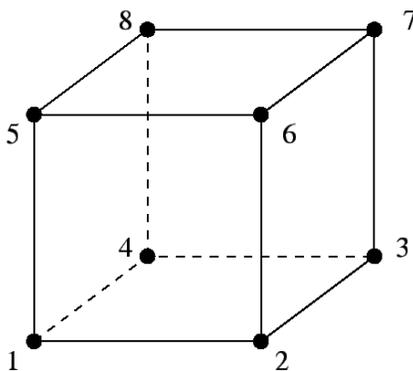


Figura 63 (a)Tipos de elementos finitos,
 (b) 3D Brick element 8 nodes
 Fuente: Modificado de Manriquez (2002)

Para el caso del presente estudio se utilizarán elementos tridimensionales en forma de hexaedro (3D Brick element 8 nodes) (véase Figura 63 (b)), ya que estos elementos permiten distorsionar su geometría logrando una mayor aproximación al modelo de estudio.

Los resultados de esfuerzos presentados en el programa LS - Prepost fueron calculados por LS – DYNA en el centro del elemento hexaédrico mediante el promedio de ocho puntos de Gauss (González M, 2018).

5.2.1.2. Condiciones de carga

En la falla del prototipo de tablero estructural tipo sándwich intervienen de manera importante algunos parámetros tales como la naturaleza de los materiales, el tipo de aplicación de carga, el tamaño, la forma y las condiciones del ambiente. La condición de carga por su parte es una de las más importantes, ya que de este parámetro dependerá el tipo de resultados obtenidos en el análisis.

El modelo de elementos finitos del tablero estructural tipo sándwich presentado en esta investigación se analizó bajo distintas condiciones de carga para el modo mecánico de compresión y flexión.

5.2.1.2.1. Compresión

Los modelos realizados para el modo mecánico de compresión se analizaron bajo la influencia de dos condiciones de carga específica, incluyendo: (i) peso propio de la estructura, (ii) presión uniforme en dirección axial sobre una de las superficies del modelo (véase Figura 64).

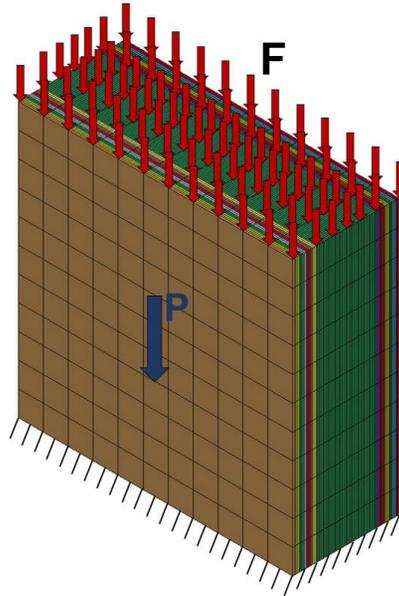


Figura 64 Casos de aplicación de carga en el modelo de elementos finitos del modo mecánico de compresión

La carga de peso propio (P) actúa verticalmente en dirección de la gravedad y se calculó en función de la densidad seca del material (véase Sección 4.3.1.1) y la gravedad (9.81 m/s^2). La carga de aplicación externa (F), es una fuerza distribuida uniforme sobre la cara superior del modelo, esta se determinó como el promedio de los valores máximos de fuerza de cada serie de datos en las pruebas de laboratorio.

5.2.1.2.2. Flexión

Los modelos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich ensayados bajo el modo mecánico de flexión se analizaron en función de dos condiciones de carga: (i) peso propio de la estructura, (ii) presión distribuida en dos puntos del tablero.

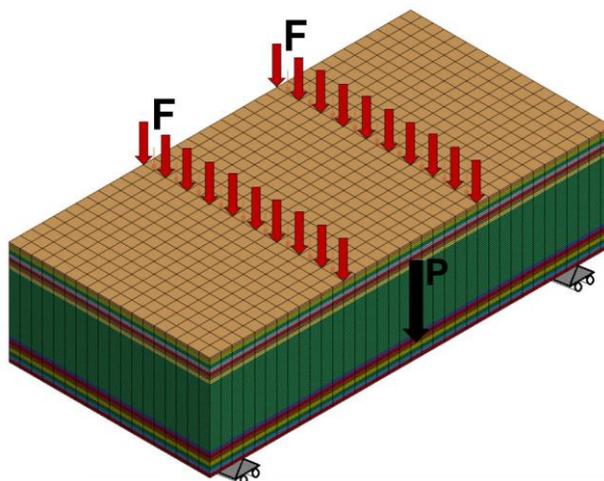


Figura 65 Casos de aplicación de carga en el modelo de elementos finitos del modo mecánico de flexión

El peso propio (P) que actúa verticalmente en dirección de la gravedad (véase Figura 65), se calculó en función de la densidad seca del material (véase sección 4.3.1.1) y el valor de la gravedad (9.81 m/s^2). La carga aplicada en dos puntos del tablero se distribuyó a lo ancho del tablero (véase Figura 65) y se determinó como un promedio de los valores máximos de fuerza presentados en las series de datos obtenidos en laboratorio. Los valores de carga aplicada para cada modo mecánico y cada tipo de prototipo de tablero estructural se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26
Carga aplicada en cada caso de modelación

Ensayo	Prototipo	Carga (N)
Compresión	P1	148695,4
	P2	369754,0
Flexión	P1	30687,7
	P2	65913,4

5.2.1.3. Método seleccionado para medición de la progresión de esfuerzos.

Por lo regular se entiende por falla de una estructura o de algunas partes de la misma: a la rotura, o sin llegar a tanto, la existencia de una condición inadecuada. Las fallas se pueden presentar por deformaciones excesivamente grandes, falta de estabilidad de materiales, fisuraciones, vuelco o pérdida de equilibrio estático por pandeo. De todo este compendio de fallas en la presente investigación se limitará a analizar la falla por rotura (Hernández, 2002).

Determinar el criterio de falla para el análisis de resistencia del material es importante ya que en base a este se obtiene resultados reales y comparables con los resultados de laboratorio, es por esto que, basándonos en las características del prototipo de tablero estructural tipo sándwich, se opta por utilizar el criterio de falla Von Mises, el cual se usa en el contexto de teorías de fallo, como un indicador de buen diseño de materiales dúctiles. Von Mises propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasa cierto valor (Suntaxi Llumiquinga, 2014). La teoría de Von Mises proporcionó una evaluación fiable de la falla del material bajo fuerzas de compresión y flexión. Además, la teoría 3D de Von Mises mostro valores más acertados que otros análisis determinados en el programa por defecto. Pero esto no fue una simple decisión ya que se realizaron análisis con diferentes criterios de falla que el programa LS-DYNA provee, tales como esfuerzos en cada dirección y esfuerzos resultantes totales, estos presentaron resultados cercanos a los planteados en laboratorio, pero no se optó por trabajar con estos criterios debido a que la variación entre sus resultados era alta con

una tendencia poco uniforme, lo que no pasaba con el criterio de falla de Von Mises, por lo cual se lo escogió.

5.2.1.4. Modelo óptimo de convergencia

Para determinar los modelos óptimos de convergencia para cada ensayo se realizaron un total de 36 modelos de elementos finitos entre el modo mecánico de compresión y flexión. El modelo óptimo de convergencia será escogido en cada caso en base a dos aspectos; (i) relación de aspecto menor a 10 y (ii) el tiempo de procesamiento óptimo para determinar los parámetros necesarios en cada caso.

Además, se consideraron dos parámetros para determinar el punto de convergencia cuando el número de elementos totales varió: (i) el esfuerzo máximo de compresión que se produce en dirección axial, para el ensayo de compresión y el esfuerzo máximo a flexión cuando la carga se aplica en dirección perpendicular, para el ensayo de flexión; (ii) el desplazamiento máximo vertical, para ambos casos.

5.2.1.4.1. Modo mecánico de compresión

5.2.1.4.1.1. Prototipo 1

Para el prototipo 1 se analizaron nueve modelos de elementos finitos sometidos a una fuerza distribuida de compresión de 15173 kg. Estos se realizaron con el fin de establecer el modelo óptimo de elementos finitos para realizar el análisis de resultados respectivo. La Tabla 27 presenta información detallada sobre cada modelo analizado. Para definir el modelo óptimo de convergencia en este caso se consideraron dos

aspectos importantes: (i) una relación de aspecto menor a 10 y (ii) un tiempo no superior a 5 horas y 17 minutos para procesar el modelo del prototipo.

Además, se consideraron dos parámetros para encontrar el punto de convergencia mientras se variaba el número de elementos del modelo: (i) esfuerzo máximo en dirección axial (tangencial) y (ii) el desplazamiento resultante en dirección de aplicación de carga (T).

Tabla 27

Resultados del estudio de convergencia del modo mecánico de compresión. Prototipo 1

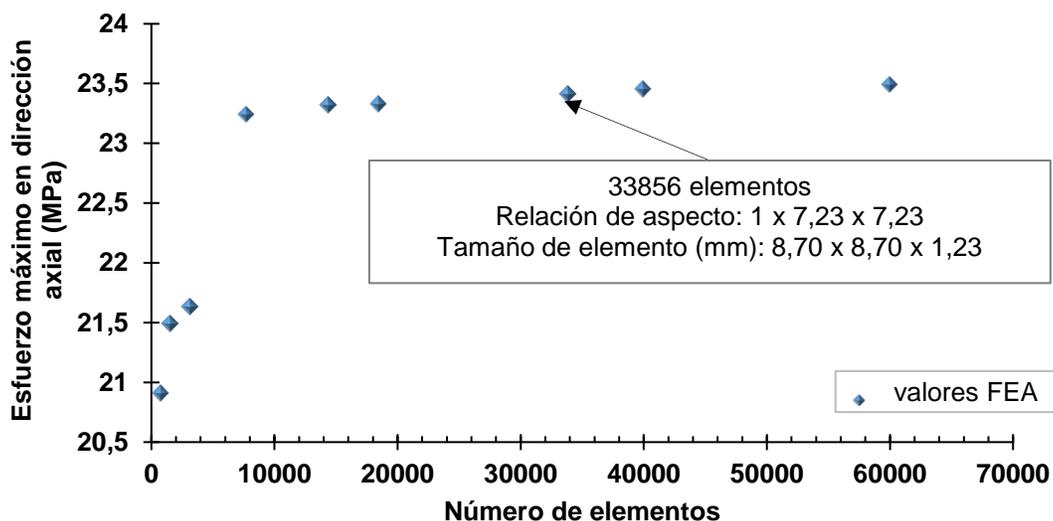
FE Mod	# elementos	Número divisiones en FEM			Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	Esfuerzo máximo en dirección axial Von Mises (MPa)	Desp. máximo vertical en dirección T Result disp (mm)
		(L)	(R)	(T)	(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)			
1	800	5	5	14	40,0	40,0	2,5	1,0	16,3	16,3	15 min	20,91	0,97
		5	5	18	40,0	40,0	2,4	1,0	16,6	16,6			
2	1568	7	7	14	28,6	28,6	2,5	1,0	11,7	11,7	24 min	21,49	0,94
		7	7	18	28,6	28,6	2,4	1,0	11,9	11,9			
3	3200	10	10	14	20,0	20,0	2,5	1,0	8,2	8,2	40 min	21,63	0,92
		10	10	18	20,0	20,0	2,4	1,0	8,3	8,3			
4	7744	11	11	28	18,2	18,2	1,2	1,0	14,8	14,8	1 h 21 min	23,24	0,86
		11	11	36	18,2	18,2	1,2	1,0	15,1	15,1			
5	14400	15	15	28	13,3	13,3	1,2	1,0	10,9	10,9	2h 43 min	23,32	0,82
		15	15	36	13,3	13,3	1,2	1,0	11,1	11,1			
6	18496	17	17	28	11,8	11,8	1,2	1,0	9,6	9,6	3 h 54 min	23,33	0,80
		17	17	36	11,8	11,8	1,2	1,0	9,8	9,8			
7	33856	23	23	28	8,7	8,7	1,2	1,0	7,1	7,1	5 h 17 min	23,41	0,76
		23	23	36	8,7	8,7	1,2	1,0	7,2	7,2			
8	40000	25	25	28	8,0	8,0	1,2	1,0	6,5	6,5	9 h 44 min	23,45	0,75
		25	25	36	8,0	8,0	1,2	1,0	6,7	6,7			
9	60000	25	25	42	8,0	8,0	0,8	1,0	9,8	9,8	10 h 9 min	23,49	0,75
		25	25	54	8,0	8,0	0,8	1,0	10,0	10,0			

* (L), (R) Y (T), son las direcciones longitudinal, radial y tangencial determinadas en el Capítulo 4.

En base a los resultados presentados en la Tabla 27 se escogió que para el prototipo 1 bajo el modo mecánico de compresión el modelo número 7 con 33856 elementos presenta los resultados óptimos de este modelo.

La Figura 66 (a) presenta la relación de convergencia entre esfuerzo máximo en dirección tangencial (T) y # elementos, mientras que la Figura 66 (b) presenta la relación entre desplazamiento resultante en dirección tangencial (T) y # elementos.

(a)



(b)

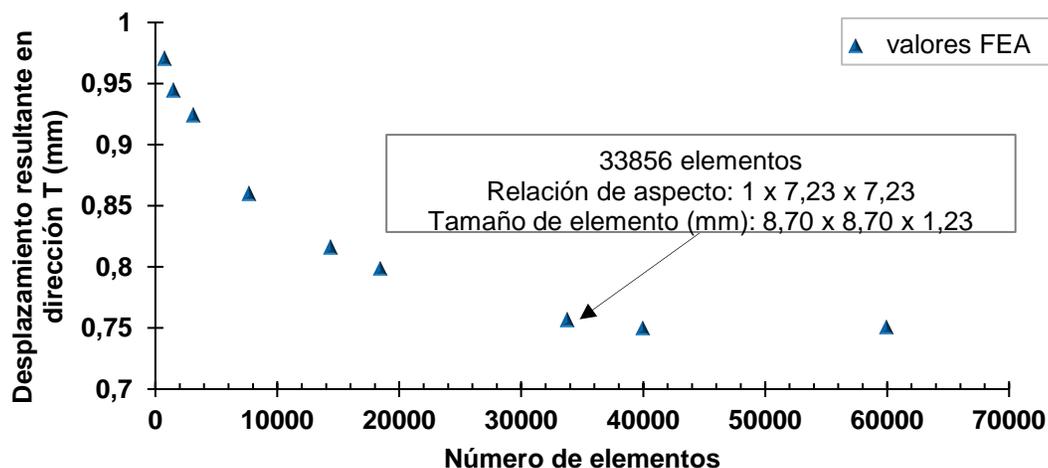


Figura 66 Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección axial, b) desplazamiento resultante en dirección tangencial (T). Prototipo 1 compresión

Las Figuras 66 (a) y 66 (b) muestran que los resultados empezaron a converger cuando el modelo FE del prototipo 1 tenía un total de 14400 elementos. Aunque este modelo proporcionó resultados razonables, no se adoptó en el estudio actual, ya que su relación de aspecto era superior a 10 (consulte la Tabla 27). Por lo tanto, se seleccionó un modelo FE de 33856 elementos, con una relación de aspecto menor que 10, como el más apropiado para llevar a cabo lo análisis de elementos finitos

5.2.1.4.1.2. Prototipo 2

De igual manera, para el prototipo 2 se analizaron nueve modelos de elementos finitos sometido a una fuerza distribuida de compresión de 37730 kg. En la Tabla 28 se presentan los detalles sobre cada modelo analizado. A la hora de determinar el modelo óptimo de convergencia se tuvieron en cuenta dos aspectos: (i) una relación de aspecto menor a 10 para cada elemento y (ii) un tiempo de procesamiento no superior a 23 horas y 34 minutos. Para determinar el modelo óptimo de convergencia se consideraron los mismos parámetros que en el prototipo 1, Sección 5.2.1.4.1.1.

Tabla 28

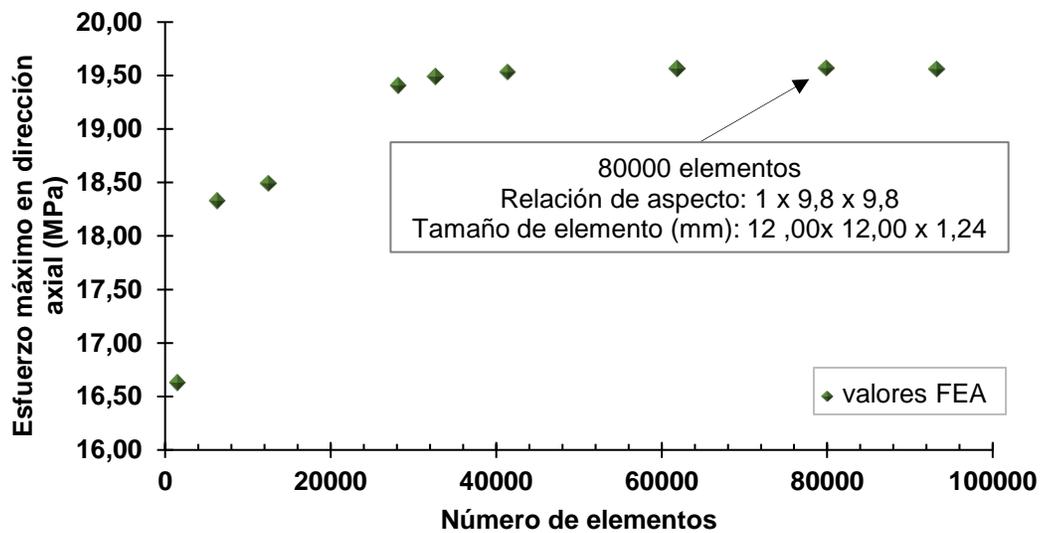
Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de compresión. Prototipo 2

FE Mod	# elementos	Número de divisiones en FEM			Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	Esfuerzo máximo en dirección axial	Desp. máximo vertical
		(L)	(R)	(T)	(L)	(R)	(T)	L/R	L/T	R/T			
No.		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)					Von Mises (MPa)	Result disp (mm)
1	1600	5	5	28	60,0	60,0	2,5	1,0	24,5	24,5	29 min	16,63	1,74
		5	5	36	60,0	60,0	2,5	1,0	24,3	24,3			
2	6400	10	10	28	30,0	30,0	2,5	1,0	12,2	12,2	1 h 23 min	18,33	1,62
		10	10	36	30,0	30,0	2,5	1,0	12,1	12,1			
3	12544	14	14	28	21,4	21,4	2,5	1,0	8,7	8,7	2 h 48 min	18,49	1,50
		14	14	36	21,4	21,4	2,5	1,0	8,7	8,7			
4	28224	21	21	28	14,3	14,3	2,5	1,0	5,8	5,8	4 h 43 min	19,41	1,40
		21	21	36	14,3	14,3	2,5	1,0	5,8	5,8			
5	32768	16	16	56	18,8	18,8	1,2	1,0	15,3	15,3	5 h 36 min	19,49	1,38
		16	16	72	18,8	18,8	1,2	1,0	15,2	15,2			
6	41472	18	18	56	16,7	16,7	1,2	1,0	13,6	13,6	10 h 16 min	19,53	1,36
		18	18	72	16,7	16,7	1,2	1,0	13,5	13,5			
7	61952	22	22	56	13,6	13,6	1,2	1,0	11,1	11,1	16 h 17 min	19,57	1,34
		22	22	72	13,6	13,6	1,2	1,0	11,0	11,0			
8	80000	25	25	56	12,0	12,0	1,2	1,0	9,8	9,8	23 h 34 min	19,57	1,33
		25	25	72	12,0	12,0	1,2	1,0	9,7	9,7			
9	93312	27	27	56	11,1	11,1	1,2	1,0	9,1	9,1	28 h 44 min	19,56	1,33
		27	27	72	11,1	11,1	1,2	1,0	9,0	9,0			

En base a los resultados presentados en la Tabla 28 se escogió para el prototipo 2 bajo el modo mecánico de compresión el modelo número 8 con 80000 elementos ya que presenta los resultados óptimos para este modelo.

La Figura 67 (a) indica la relación de convergencia entre esfuerzo máximo y # elementos, mientras que la Figura 67 (b) presenta la relación entre desplazamiento resultante en dirección tangencial (T) y # elementos para el prototipo 2.

(a)



(b)

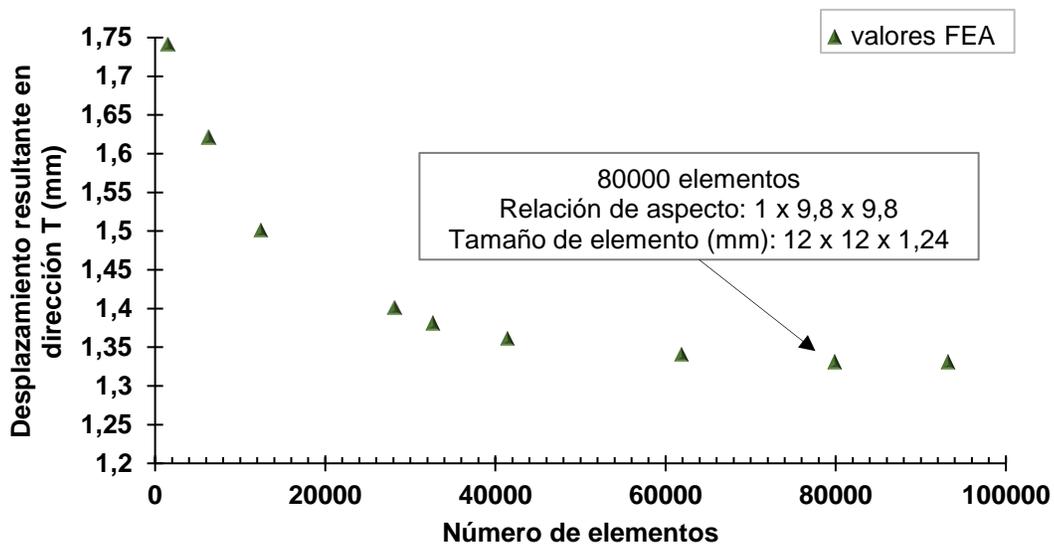


Figura 67 Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección axial, b) desplazamiento resultante en dirección tangencial (T). Prototipo 2 compresión

Las Figuras 67 (a) y 67 (b) muestran que estos resultados empezaron a converger cuando el modelo FE del prototipo 2 comprendía 32768 elementos. Aunque este modelo

La Figura 68 (a) muestra el modelo de compresión previo a la aplicación de carga, mientras que la Figura 68 (b) muestra el modelo de compresión cuando la carga máxima ha sido aplicada y mantenida; estas figuras son un ejemplo del tipo de modelos realizados en esta investigación y del tipo de procesamiento que se realizó.

5.2.1.4.2. Modo mecánico de flexión

5.2.1.4.2.1. Prototipo 1

Para el modo mecánico de flexión en el prototipo 1 se analizaron nueve modelos de elementos finitos sometido a una fuerza de flexión de 3131.4 kg. Todos los modelos se realizaron con el fin de encontrar el modelo óptimo para realizar el análisis de resultados respectivo. Los detalles de cada uno de los modelos de elementos finitos se presentan en la Tabla 29. Se consideraron dos aspectos al definir el modelo óptimo en este estudio: (i) una relación de aspecto no superior a 10 para cada elemento y (ii) un tiempo no superior a 66 horas y 19 minutos para procesar el modelo del prototipo.

Además, se consideraron dos parámetros para encontrar el punto de convergencia cuando el número total de elementos del prototipo variaba en el modelo: (i) el esfuerzo máximo en la dirección longitudinal (L) y (ii) el desplazamiento máximo en la dirección longitudinal (L).

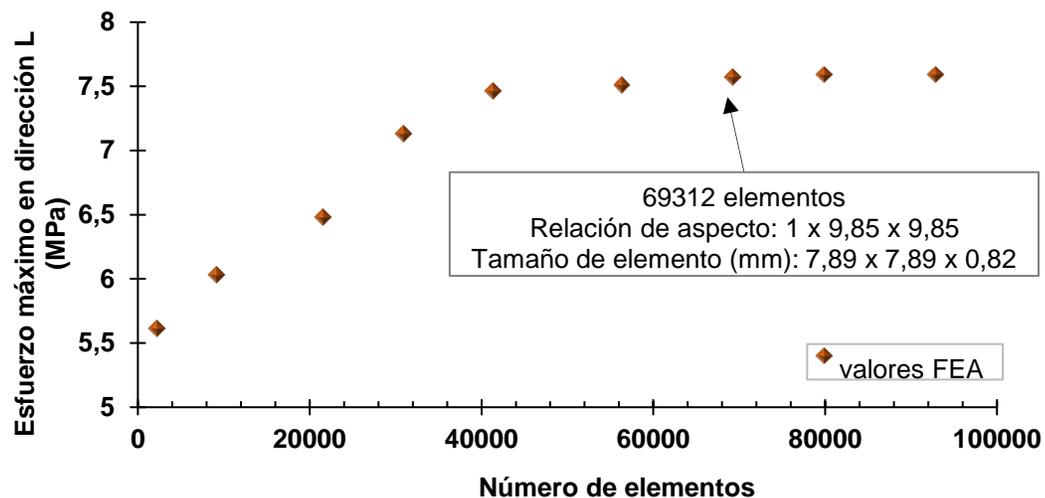
Tabla 29*Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de flexión. Prototipo 1*

FE Mod	# elem	Número de divisiones en FEM			Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	Esfuerzo máximo en dirección L	Desp. máximo vertical en dirección L
					(L)	(R)	(T)	L/R	L/T	R/T		Von Mises (MPa)	Result disp (mm)
No.		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)						
1	2304	12	6	14	25,0	25,0	2,5	1,0	10,2	10,2	3 h 23 min	5,61	5,12
		12	6	18	25,0	25,0	2,4	1,0	10,4	10,4			
2	9216	24	12	14	12,5	12,5	2,5	1,0	5,1	5,1	7 h 56 min	6,03	4,83
		24	12	18	12,5	12,5	2,4	1,0	5,2	5,2			
3	21632	26	13	28	11,5	11,5	1,2	1,0	9,4	9,4	18 h 25 min	6,48	4,67
		26	13	36	11,5	11,5	1,2	1,0	9,6	9,6			
4	30976	44	22	14	6,8	6,8	2,5	1,0	2,8	2,8	24 h 14 min	7,13	4,52
		44	22	18	6,8	6,8	2,4	1,0	2,8	2,8			
5	41472	36	18	28	8,3	8,3	1,2	1,0	6,8	6,8	33 h 32 min	7,46	4,45
		36	18	36	8,3	8,3	1,2	1,0	6,9	6,9			
6	56448	42	21	28	7,1	7,1	1,2	1,0	5,8	5,8	49 h 47 min	7,51	4,34
		42	21	36	7,1	7,1	1,2	1,0	5,9	5,9			
7	69312	38	19	42	7,9	7,9	0,8	1,0	9,7	9,7	66 h 19 min	7,57	4,32
		38	19	54	7,9	7,9	0,8	1,0	9,8	9,8			
8	80000	50	25	28	6,0	6,0	1,2	1,0	4,9	4,9	73 h 2 min	7,59	4,31
		50	25	36	6,0	6,0	1,2	1,0	5,0	5,0			
9	92928	44	22	42	6,8	6,8	0,8	1,0	8,3	8,3	78 h 14 min	7,59	4,33
		44	22	54	6,8	6,8	0,8	1,0	8,5	8,5			

En base a los resultados presentados en la Tabla 29 se escogió que para el prototipo 1 bajo el modo mecánico de flexión el modelo número 7 con 69312 elementos presenta los resultados óptimos para el análisis.

La Figura 69 (a) presenta la relación de convergencia entre esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L) y # elementos, mientras que la Figura 69 (b) presenta la relación entre desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L) frente al # elementos.

(a)



(b)

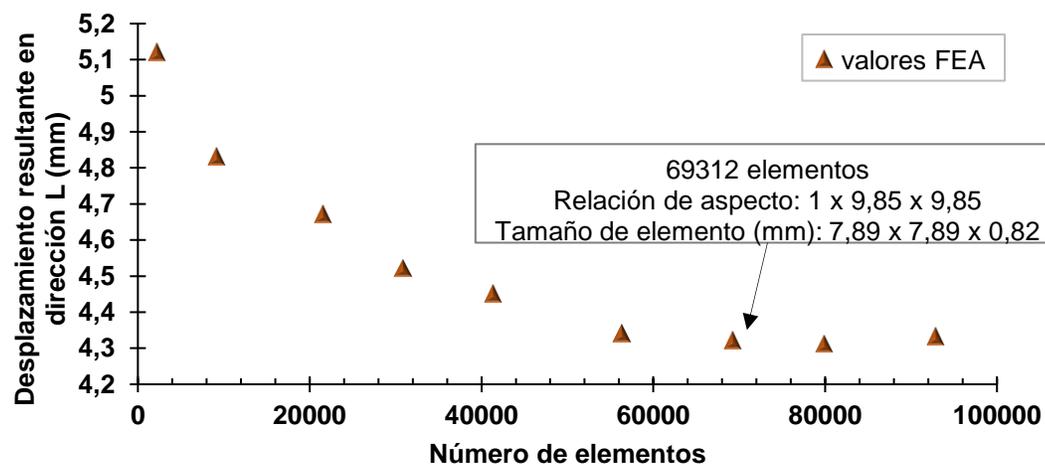


Figura 69 Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L), b) desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L). Prototipo 1 flexión

Las Figuras 69 (a) y 69 (b) muestran que los resultados empezaron a converger cuando el modelo FE del prototipo 1 tenía un total de 56448 elementos. Aunque este modelo proporcionó resultados razonables, no se adoptó como el mejor, ya que para ese número de elementos los valores de esfuerzo si convergían, pero no los de desplazamiento. Por lo tanto, se seleccionó un modelo FE de 69312 elementos, en el que los dos parámetros convergían, como el más apropiado para llevar a cabo el análisis de elementos finitos

5.2.1.4.2.2. Prototipo 2

Para el prototipo 2 en el modo mecánico de flexión se realizaron nueve modelos de elementos finitos sometido a una fuerza de flexión de 6725.86 kg, con el objetivo de definir el modelo de elementos finitos adecuado para realizar el análisis respectivo. En la Tabla 30 consta la información detallada de los modelos analizados. El modelo óptimo de convergencia fue determinado en base a dos parámetros: (i) una relación de aspecto no superior a 10 para cada elemento y (ii) un tiempo no superior a 53 horas y 36 minutos para procesar el modelo del prototipo.

En la determinación del modelo óptimo de convergencia en cuestión de resultados se utilizaron los mismos parámetros utilizados para el prototipo 1, en la Sección 5.2.1.4.2.1

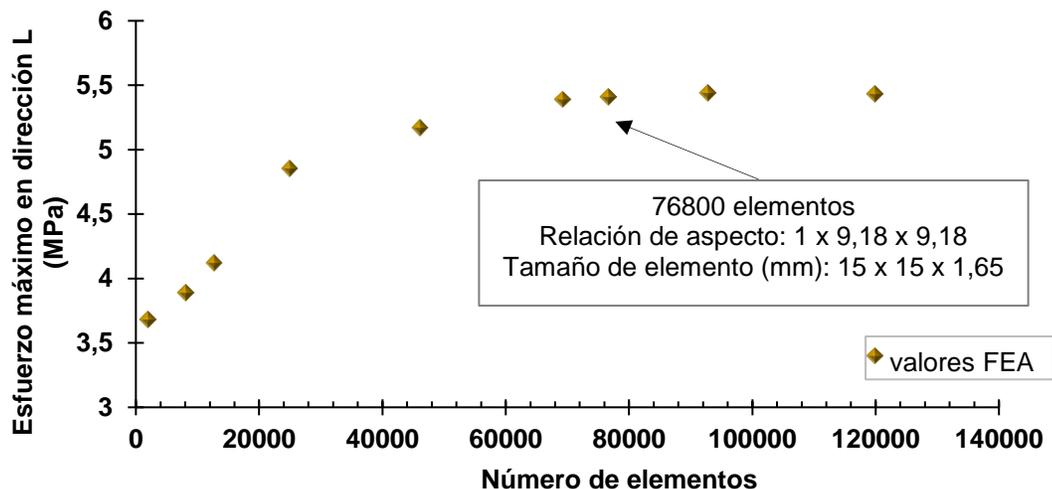
Tabla 30*Resultados del modelo de convergencia del modo mecánico de flexión. Prototipo 2*

FE Mod	Carga Flex (Kg)	# elem	Número de divisiones en FEM			Tamaño de elemento			Aspect Ratio			Tiempo para procesar FEM	Esfuerzo máximo en dirección L	Desp. máximo vertical en dirección L
						(L)	(R)	(T)	L/R	L/T	R/T		Von Mises (MPa)	Result disp (mm)
No.	(Kg)		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)						
1	6725,9	2048	8	4	28	75,0	75,0	2,5	1,0	30,6	30,6	3 h 53 min	3,68	26,58
			8	4	36	75,0	75,0	2,5	1,0	30,3	30,3			
2	6725,9	8192	16	8	28	37,5	37,5	2,5	1,0	15,3	15,3	5 h 42 min	3,89	26,13
			16	8	36	37,5	37,5	2,5	1,0	15,2	15,2			
3	6725,9	12800	20	10	28	30,0	30,0	2,5	1,0	12,2	12,2	9 h 23 min	4,12	25,77
			20	10	36	30,0	30,0	2,5	1,0	12,1	12,1			
4	6725,9	25088	28	14	28	21,4	21,4	2,5	1,0	8,7	8,7	14 h 47 min	4,85	25,12
			28	14	36	21,4	21,4	2,5	1,0	8,7	8,7			
5	6725,9	46208	38	19	28	15,8	15,8	2,5	1,0	6,4	6,4	31 h 14 min	5,17	24,63
			38	19	36	15,8	15,8	2,5	1,0	6,4	6,4			
6	6725,9	69312	38	19	42	15,8	15,8	1,6	1,0	9,7	9,7	42 h 19 min	5,39	24,49
			38	19	54	15,8	15,8	1,6	1,0	9,6	9,6			
7	6725,9	76800	40	20	42	15,0	15,0	1,6	1,0	9,2	9,2	53 h 36 min	5,41	24,44
			40	20	54	15,0	15,0	1,6	1,0	9,1	9,1			
8	6725,9	92928	44	22	42	13,6	13,6	1,6	1,0	8,3	8,3	72 h 15 min	5,44	24,44
			44	22	54	13,6	13,6	1,6	1,0	8,3	8,3			
9	6725,9	120000	50	25	42	12,0	12,0	1,6	1,0	7,3	7,3	87 h 51 min	5,43	24,46
			50	25	54	12,0	12,0	1,6	1,0	7,3	7,3			

Basándose en los resultados presentados en la Tabla 30 se escogió que para el prototipo 2 bajo el modo mecánico de flexión el modelo número 7 con 76800 elementos presenta los resultados óptimos para él análisis.

La Figura 70 (a) presenta la relación de convergencia entre esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L) y # elementos, mientras que la Figura 70 (b) presenta la relación entre desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L) y # elementos.

(a)



(b)

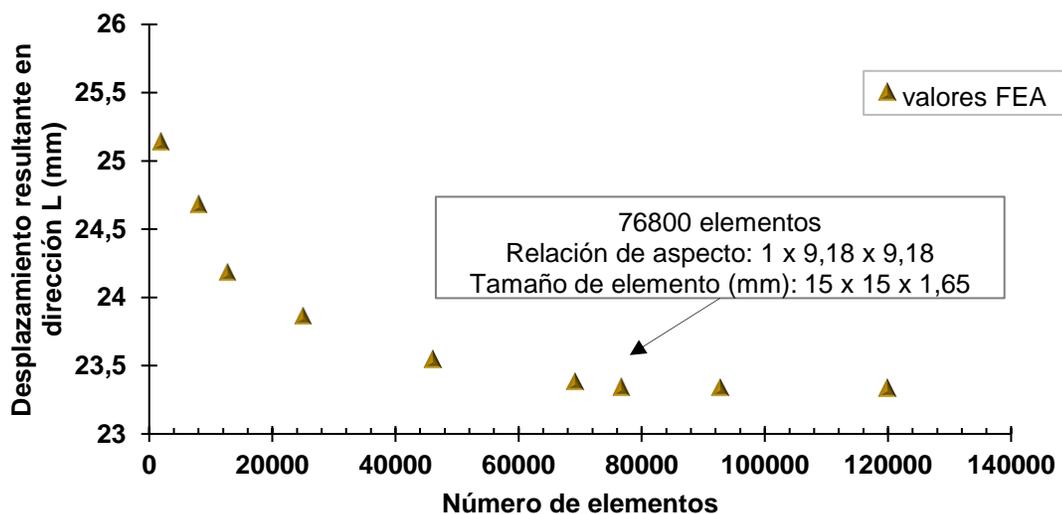
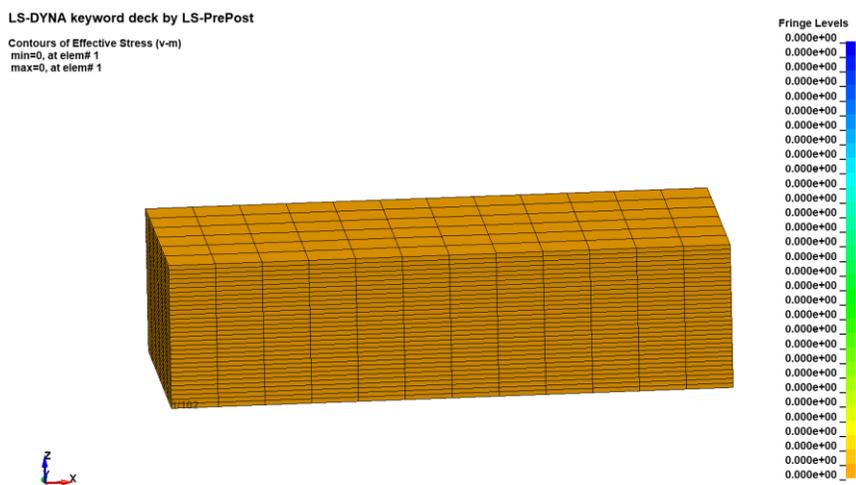


Figura 70 Resultados de convergencia que muestran la relación del número total de elementos en el modelo FE contra a) esfuerzo máximo en dirección longitudinal (L), b) desplazamiento resultante en dirección longitudinal (L). Prototipo 2 flexión

Las Figuras 70 (a) y 70 (b) muestran que los resultados empezaron a converger cuando el modelo de elementos finitos del prototipo 2 comprendía 69312 elementos, pero no se adoptó en el estudio actual ya que no convergía para ambos parámetros, por lo tanto, el modelo más apropiado para llevar a cabo el análisis de elementos finitos es el modelo 7 con 76800 elementos.

(a)



(b)

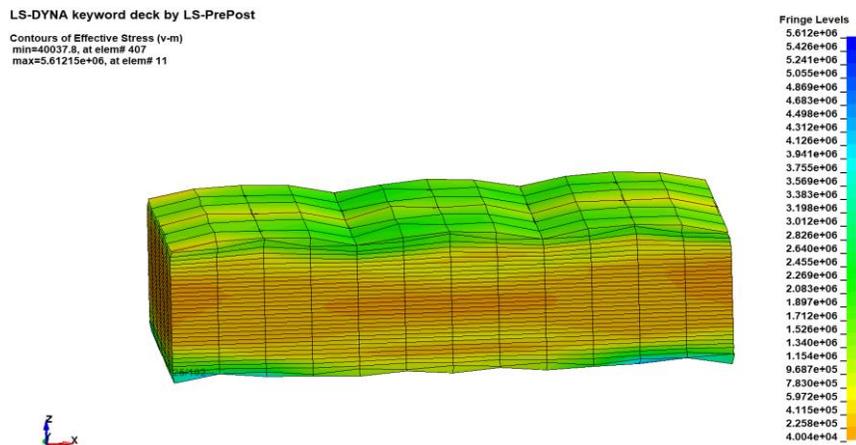


Figura 71 Ejemplo de la modelación del prototipo de tablero estructural tipo sándwich en elementos finitos, (a) modelo previo a la aplicación de carga, (b) modelo una vez aplicada y mantenida la carga a flexión

La Figura 71 (a) muestra el modelo de flexión previo a la aplicación de carga, mientras que la Figura 71 (b) muestra el modelo de flexión cuando la carga máxima ha sido aplicada y mantenida. Las figuras muestran el tipo de modelación realizada y cual fue su resultado al procesar el modelo de elementos finitos.

5.2.2. Análisis de elementos finitos

Se realizaron un total de 36 análisis de esfuerzo y desplazamiento por medio de 3D FEA, para evaluar la biomecánica del tablero estructural tipo sándwich bajo condiciones de carga.

En esta sección se investiga los efectos producidos por las condiciones de carga aplicadas en el tablero estructural tipo sándwich, en términos de esfuerzos desarrollados y la evolución consecuente de la falla del material.

5.2.2.1. Biomecánica del tablero estructural tipo sándwich

Para establecer la biomecánica del prototipo de tablero estructural tipo sándwich se debe conocer cuál es el comportamiento que tiene ante aplicación de carga, también el esfuerzo máximo que soporta y la evolución de falla para cada modo mecánico.

El comportamiento ante la aplicación de carga y el desarrollo del esfuerzo máximo se estudió en base a un análisis estático no lineal de elementos finitos. Para esto se aplicó carga progresivamente que al final se mantenía por un lapso de tiempo y así determinar el esfuerzo máximo y su progreso.

Por otra parte, el desarrollo de la evolución de falla se evidencio de dos maneras; (i) identificando como sucede la falla durante las pruebas de laboratorio y (ii) distinguiendo como se desarrolla la falla en el modelo de elementos finitos.

5.2.3. Eficiencia mecánica de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich

En esta sección se examina los efectos producidos por la distribución de la densidad dentro de la estructura del tablero estructural tipo sándwich.

Según Speck y Burgert (2011), desde el punto de vista de la mecánica estructural, los tallos de las plantas se pueden considerar como vigas compuestas, jerárquicamente estructuradas y reforzadas con fibras que:

- Soportan cargas estáticas y dinámicas creadas por su propia masa y / o por carga de viento.
- Almacenan y liberan energía elástica.
- Se doblan a través de grandes ángulos.
- Resisten el pandeo y la fractura.

Este estudio describe la extraordinaria eficiencia mecánica de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich y se los compara con algunos materiales de ingeniería avanzada en términos de índices de rendimiento del material (IP). La eficiencia mecánica de la madera es una de las razones por las cuales sus tallos soportan condiciones extremas como huracanes, tornados y tsunamis, sin fallas significativas.

La relación forma-estructura-función, las propiedades del biomaterial y el rendimiento mecánico son, por lo tanto, científicamente valiosos para investigar y simular en aplicaciones biomiméticas y futuras mejoras de los productos de madera de ingeniería actuales (EWPs).

El comportamiento ortotrópico característico del bio-compuesto y la fuerte dependencia lineal de las propiedades mecánicas de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich, es la relación que prima al momento de determinar la eficiencia mecánica del mismo.

5.2.3.1. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y rigidez del material

La composición y la estructura celular de los bio-elementos utilizados, dan lugar a una eficiencia mecánica significativa. Esta relación generalmente se expresa como un índice de rendimiento del material que depende del modo de carga, por ejemplo, las columnas llevan cargas axiales de compresión, los ejes llevan torque y las vigas llevan predominantemente momentos de flexión.

El índice de rendimiento desarrollado por Ashby (1994), se utiliza en la fase de diseño del material una vez que su geometría ha sido definida. El índice brinda la oportunidad de comparar entre materiales candidatos, para seleccionar el más adecuado para una situación dada.

Según Huang et al. (2009) el rendimiento (P) de un elemento estructural diseñado se describe por su geometría, el material constitutivo (M) y los requisitos funcionales (F) como se muestra en la Ecuación 23.

$$P = f(M, G, F) \quad (23)$$

Para este caso específico denota el rendimiento del material para sufrir deformaciones cuando los esfuerzos de compresión, flexión y corte actúan sobre los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich. La Ecuación 24 se utiliza para determinar el índice de rendimiento y se presenta a continuación,

$$PI_1 = \frac{MOE^{\frac{1}{3}}}{d} \quad (24)$$

donde el módulo de elasticidad (MOE) se da en GPa y la densidad seca en Mg/m³. El índice de rendimiento PI_1 de la Ecuación 24, denota el rendimiento de paneles o tableros ante desplazamientos por flexión. Además, el MOE se considera aquí para la condición de carga dominante (es decir, en la dirección T) (Ashby & Cebon, 1993).

Wegst y Ashby (2004) presenta un gráfico en el que ubica a los materiales utilizados en ingeniería en base a su módulo de elasticidad (MOE) y su densidad (véase Figura 72). En esta gráfica se traza la pendiente de los distintos índices de rendimiento calculados como la relación entre rigidez del material y densidad seca.

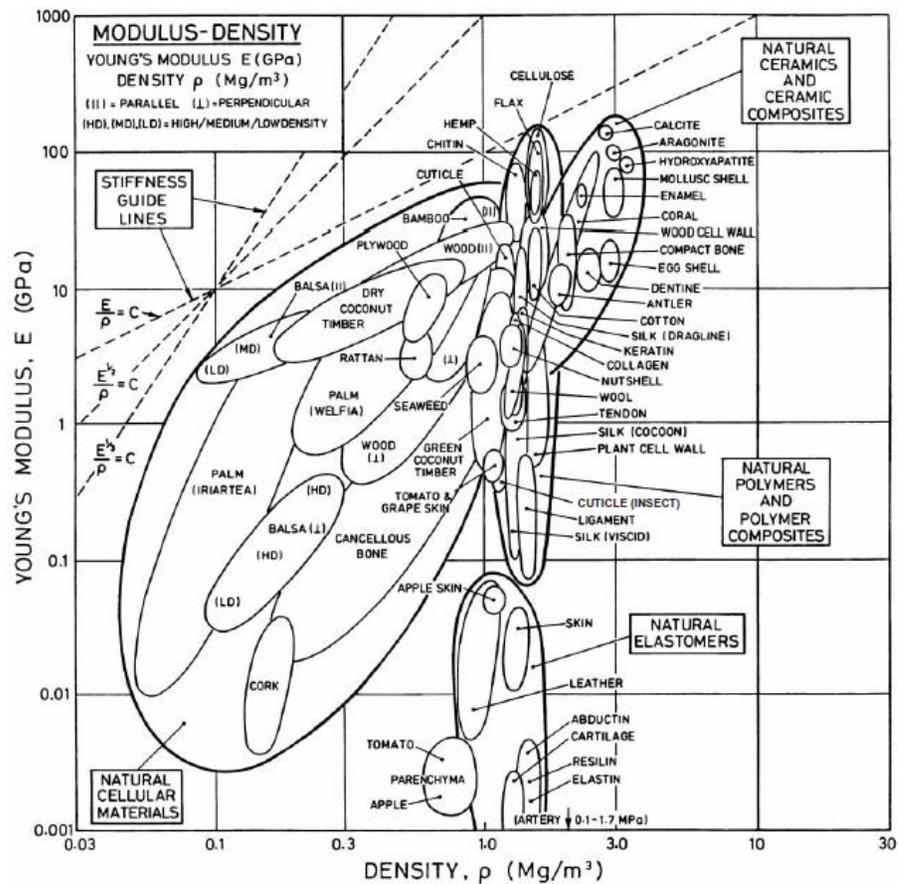


Figura 72 Propiedades de materiales naturales, representa el Módulo de Young contra la densidad. Directrices identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y rígidos
Fuente: (Wegst & Ashby, 2004)

La Figura 72 será utilizada al momento de situar los resultados de índice de rendimiento para los dos prototipos de tablero estructural tipo sándwich.

5.2.3.2. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y resistencia del material

La eficiencia mecánica también se puede determinar a partir de la relación típica de resistencia a la compresión en relación a la densidad seca. En este caso, el índice de rendimiento (PI_2) que debe calcularse se da en ($\text{MPa}^{1/2} \text{m}^3 \text{Mg}^{-1}$) y se calcula mediante la Ecuación 25,

$$PI_2 = \frac{MOR^{1/2}}{d} \quad (25)$$

donde el módulo de ruptura (MOR) se da en MPa y la densidad seca en Mg/m^3 . El índice de rendimiento PI_2 de la Ecuación 25, indica el rendimiento del material para resistir los la propagación de esfuerzos. De manera similar, el MOR se considera aquí para la condición de carga dominante en la dirección T (compresión).

Wegst y Ashby (2004) también presenta un gráfico en el que sitúa a los materiales de ingeniería en base a su esfuerzo máximo (MOR) y su densidad seca. De igual manera traza las pendientes equivalentes a los distintos índices de rendimiento a partir de la relación entre resistencia y densidad (véase Figura 73).

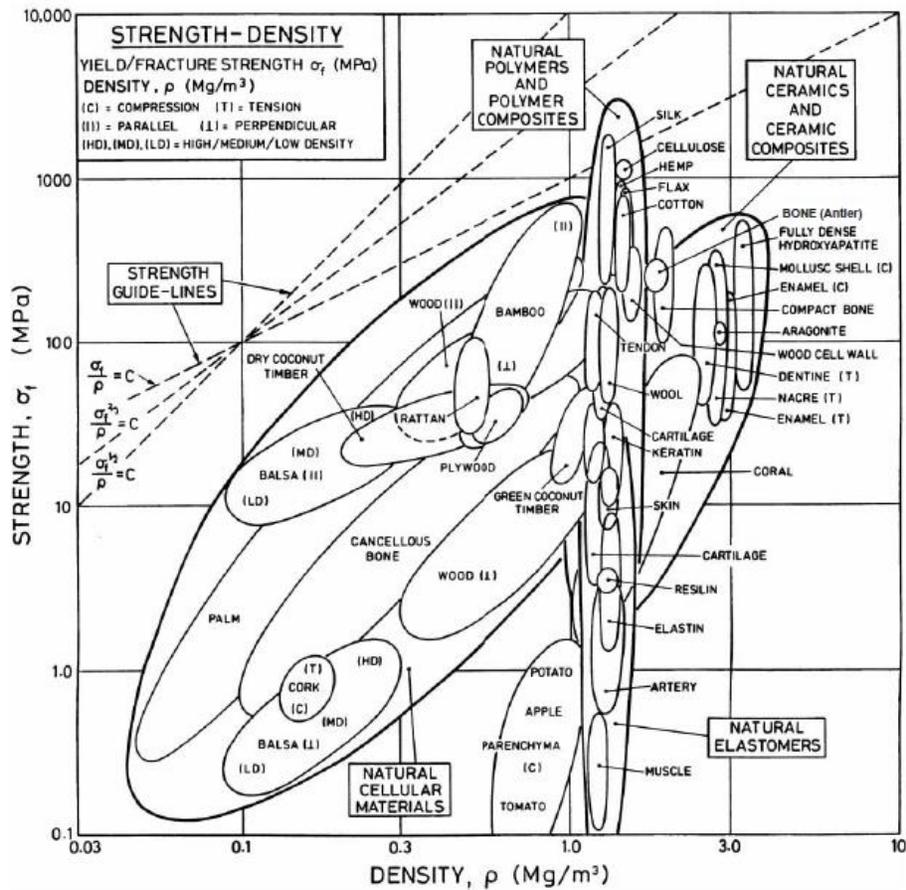


Figura 73 Propiedades de materiales naturales, representa la fuerza frente a la densidad. Directrices identifican materiales estructuralmente eficientes que son ligeros y fuertes

La Figura 73 será utilizada al momento de situar los distintos prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en base a su relación entre resistencia y densidad.

5.3. Resultados

5.3.1. Biomecánica del tablero bajo esfuerzos de compresión

El análisis de elementos finitos pudo comprobar que, durante las pruebas de compresión, al aumentar la magnitud de aplicación de carga, el material refleja mayor esfuerzo a compresión hasta llegar a su valor máximo para luego descender.

En cuanto a la evolución de la falla esta se da por aplastamiento y se localiza generalmente cerca de la parte media del panel exterior (véase Figura 74 (a)), está aparece cuando el material llega a su esfuerzo máximo y evoluciona en dirección radial del tablero desde su punto de aparición (véase Figura 74 (b)).



Figura 74 (a) Tipo de falla en el prototipo de tablero estructural tipo sándwich, (b) evolución de falla en sentido radial.

La falla que presenta el prototipo de tablero estructural tipo sándwich es una falla de caras por compresión (véase Figura 75(a)), la cual es una falla aceptable por la norma ASTM C364 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions (véase Figura 75 (b)).



Figura 75 (a) Falla presentada al momento de ensayar el modo mecánico de compresión, (b) falla admisible según norma ASTM C364

5.3.1.1. Factores de compensación

La Tabla 31 resume los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos (FEA) cuando el modelo de elementos finitos (FEM), fue sometido a condiciones de carga a compresión; los resultados presentados en la Tabla 31 fueron seleccionados de los modelos óptimos de convergencia para cada modelo, los mismos que fueron ensayados bajo el modo mecánico de compresión

Tabla 31

Datos óptimos de FEA para prototipos ensayados bajo modo mecánico de compresión

Etiquetado	Carga kgf	Número de elementos	Tiempo	Esfuerzo (Von Mises) MPa	Desplazamiento máximo vertical (Result Disp.) mm
P1C	15173	33856	5 h 17 min 54 sec	23,41	0,76
P2C	37730	41472	23 h 34 min 12 sec	19,57	1,33

Posterior a obtener los datos tanto de los ensayos de laboratorio como del Análisis Finito de Elementos (FEA) de compresión y flexión, se determina un factor de compensación que se aplica a los resultados de laboratorio de pruebas realizadas bajo el modo mecánico de compresión y flexión para conseguir un resultado validado de manera experimental y computacional.

Es necesario el cálculo de un factor de compensación, debido a efectos de fricción entre la muestra y la máquina de compresión marca Controls, transmisión de cargas no uniformes entre la marca Controls y la muestra, y la falta de equipos especializados para el estudio de biomateriales que inciden al momento de determinar el valor real de las propiedades mecánicas a determinarse. Para obtener el factor de ajuste de datos de laboratorio se aplica la Ecuación 25,

$$FC = \frac{\text{Valor de esfuerzo (FEA)}}{\text{Valor de esfuerzo determinado en laboratorio}} \quad (25)$$

La Tabla 32 también muestra los valores calculados en base a la Ecuación 25; en ella se indica los resultados obtenidos en laboratorio y los resultados del análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés), junto con el factor de compensación perteneciente a cada prototipo.

Tabla 32

Factor de compensación para el esfuerzo máximo a compresión de prototipos

Esfuerzo Máximo de Compresión			
Prototipo	Laboratorio (MPa)	FEA	Factor de compensación
P1	21,72	23,41	1,08
P2	19,07	19,57	1,03

En base a la Ecuación 25, se determina el factor de compensación de datos de compresión para cada tipo de prototipo de tablero estructural tipo sándwich siendo; (i) 1.08 para el prototipo 1 y (ii) 1.03 para el prototipo 2.

Estos factores de compensación se aplican a las series de datos obtenidos en laboratorio para determinar valores de esfuerzo máximo a compresión más apegados a la realidad. Los mismos que se presentan en las Tablas 33 y 34.

Tabla 33

Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de compresión. Prototipo 1

Muestra	Esfuerzo máximo MPa	Esfuerzo máximo compensado MPa
P1.C.1	21,18	22,87
P1.C.2	22,17	23,94
P1.C.3	21,16	22,85
P1.C.4	20,91	22,58
P1.C.5	23,16	25,01
Promedio	21,72	23,45

Tabla 34

Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de compresión. Prototipo 2

Muestra	Esfuerzo máximo MPa	Esfuerzo máximo compensado MPa
P1.C.1	21,18	22,87
P1.C.2	22,17	23,94
P1.C.3	21,16	22,85
P1.C.4	20,91	22,58
P1.C.5	23,16	25,01
Promedio	21,72	23,45

5.3.2. Biomecánica del tablero bajo esfuerzos de flexión

En las pruebas de flexión el esfuerzo se presentó de forma distinta en los dos prototipos, presentando en el tablero tipo 1 un descenso radical desde el esfuerzo máximo hasta llegar a cero. Mientras que el prototipo 2 tuvo un comportamiento diferente, ya que, al momento de llegar a su esfuerzo máximo, presenta un lapso de ductilidad, en el que el esfuerzo del material disminuye paulatinamente.

En cuanto a la falla del prototipo 1 esta es de carácter frágil, es decir, que se produce sin una apreciable deformación y con una rápida propagación de la grieta en sentido radial y longitudinal, esto se refleja en la muestra después de realizar el ensayo, la misma que se partió inmediatamente después de llegar a su esfuerzo máximo (véase Figura 76). Para este caso el prototipo trabaja en el rango elástico del material, pero no hay una transición hasta la fractura, es decir, que llega al máximo esfuerzo y falla completamente.



Figura 76 Falla de prototipo 1, para el modo mecánico de flexión

Para el prototipo 2 a flexión la evolución de la falla es distinta ya que en este caso el prototipo presenta ductilidad lo que indica que llegó a trabajar en el rango plástico. La propagación de la falla es lenta y dúctil ya que al llegar a su esfuerzo máximo esta no sucumbe inmediatamente, pues soporta un esfuerzo remanente y no se destruye. Al momento de retirar la carga aplicada el material tiene una deformación residual, mas no una fractura total, es decir que cuando llega a su esfuerzo máximo trabaja en el rango plástico (véase Figura 77).

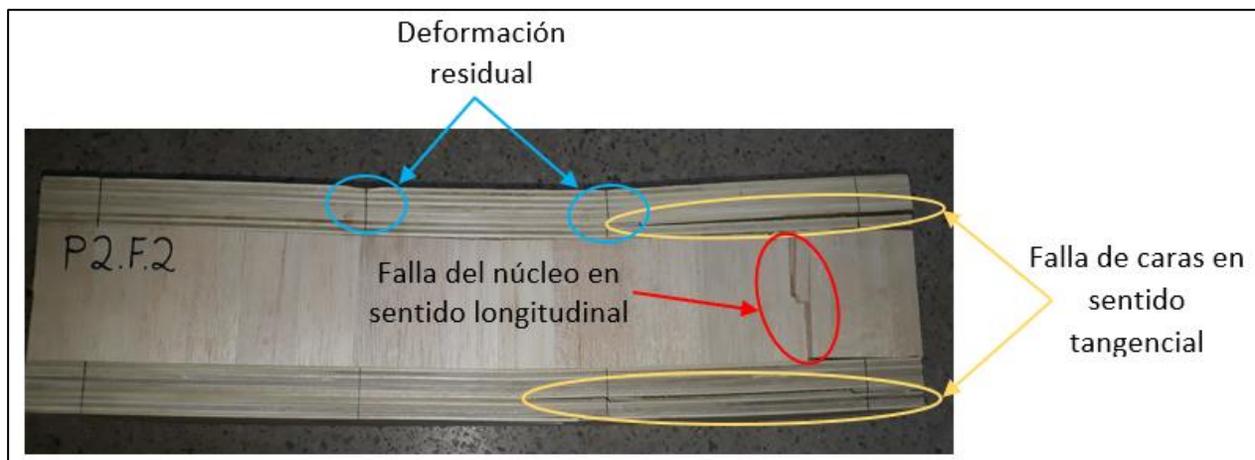


Figura 77 Falla de prototipo 2, para el modo mecánico de flexión

5.3.2.1. Factores de compensación

La Tabla 35 resume los resultados obtenidos del análisis de elementos finitos (FEA) cuando el modelo de elementos finitos (FEM), fue sometido a condiciones de carga a flexión; los resultados presentados en la Tabla 35 fueron seleccionados de los modelos óptimos de convergencia para cada modelo, los mismos que fueron ensayados bajo el modo mecánico de flexión.

Tabla 35

Datos óptimos de FEA para prototipos ensayados bajo el modo mecánico de flexión

Etiquetado	Carga kgf	Número de elementos	Tiempo	Esfuerzo (Von Mises) Mpa	Desplazamiento máximo vertical (Result Disp.) mm
P1F	3131,4	69312	66 h 19 min 7 sec	7,57	4,32
P2F	76800	76800	53 h 36 min 3 sec	5,41	24,44

Los resultados presentados en la Tabla 35 servirán para compensar los datos obtenidos en laboratorio, ya que en el modelo realizado en elementos finitos no intervienen factores externos, es decir que el ensayo se realiza en un ambiente ideal. Para obtener el factor de ajuste de datos de laboratorio se aplica la Ecuación 25, utilizada en la Sección 5.3.1.1.

La Tabla 36 presenta también los valores calculados en base a la Ecuación 25, en ella se indica los resultados obtenidos en laboratorio y los resultados del análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés), junto con el factor de ajuste perteneciente a cada prototipo.

Tabla 36

Factor de compensación para el esfuerzo máximo a flexión de prototipos

Esfuerzo Máximo de Flexión			
Prototipo	Laboratorio (MPa)	FEA	Factor de compensación
P1	8,01	7,57	0,95
P2	5,45	5,41	0,99

En base a la Ecuación 25, se determina el factor de compensación de datos de flexión para cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich siendo; (i) 0.95 para el prototipo 1 y (ii) 0.99 para el prototipo 2.

Estos factores de compensación se aplican a las series de datos obtenidos en laboratorio para que los valores de esfuerzo máximo a flexión sean más apegados a la realidad. Los mismos que se presentan en las Tablas 37 y 38.

Tabla 37

Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de flexión. Prototipo 1

Muestra	Esfuerzo de flexión de paneles exteriores (MPa)	Esfuerzo de flexión paneles exteriores compensado (MPa)
P1.F.1	8,55	8,12
P1.F.2	6,92	6,58
P1.F.3	8,16	7,75
P1.F.4	8,37	7,95
P1.F.5	8,03	7,63
Promedio	8,01	7,61

Tabla 38*Esfuerzo máximo compensado para modo mecánico de flexión. Prototipo 2*

Muestra	Esfuerzo de flexión de paneles exteriores (MPa)	Esfuerzo de flexión paneles exteriores compensado (MPa)
P2.F.1	6,89	6,82
P2.F.2	4,89	4,84
P2.F.3	5,64	5,58
P2.F.4	4,64	4,59
P2.F.5	5,21	5,16
Promedio	5,45	5,40

5.3.3. Eficiencia mecánica

Los dos tipos de índices de rendimiento, se calcularon teniendo en cuenta los datos obtenidos en los ensayos y compensados en base al análisis de elementos finitos. Estos datos se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39*Datos para el cálculo de eficiencia mecánica de los prototipos*

PROTOTIPO 1				
Dato	Valor	Unidad	Valor	Unidad
MOE	5367,6	MPa	5,37	GPa
MOR	23,45	MPa	0,02	GPa
d	281,00	kg/m ³	0,28	Mg/m ³
PROTOTIPO 2				
Dato	Valor	Unidad	Valor	Unidad
MOE	4347,16	MPa	4,35	GPa
MOR	19,45	MPa	0,02	GPa
d	269,7	kg/m ³	0,27	Mg/m ³

La Tabla 39 muestra los datos necesarios de cada prototipo para determinar los distintos tipos de índice de rendimiento, las ecuaciones para calcular los índices de

rendimiento utilizan unidades distintas a las que se han ocupado en esta investigación, es por eso que se presenta en la Tabla 39 los mismos valores en distintas unidades.

5.3.3.1. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y rigidez del material

Los resultados obtenidos al calcular el índice de rendimiento que relaciona la rigidez del material con la densidad (PI_1), se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40
Índice de rendimiento (PI_1)

PROTOTIPO 1		
Fórmula	Valor	Unidad
$PI_1 = \frac{MOE^{\frac{1}{3}} (GPa)}{d \left(\frac{Mg}{m^3} \right)}$	6,23	$\frac{GPa^{\frac{1}{3}} * m^3}{Mg}$
PROTOTIPO 2		
Fórmula	Valor	Unidad
$PI_1 = \frac{MOE^{\frac{1}{2}} (GPa)}{d \left(\frac{Mg}{m^3} \right)}$	6,05	$\frac{GPa^{\frac{1}{2}} * m^3}{Mg}$

Los resultados de índice de rendimiento (PI_1) fueron 6.23 $GPa^{1/3}m^3Mg^{-1}$ para el prototipo 1 y 6.05 $GPa^{1/3}m^3Mg^{-1}$ para el prototipo 2. Estos resultados se sitúan en la Figura 78 de la siguiente manera.

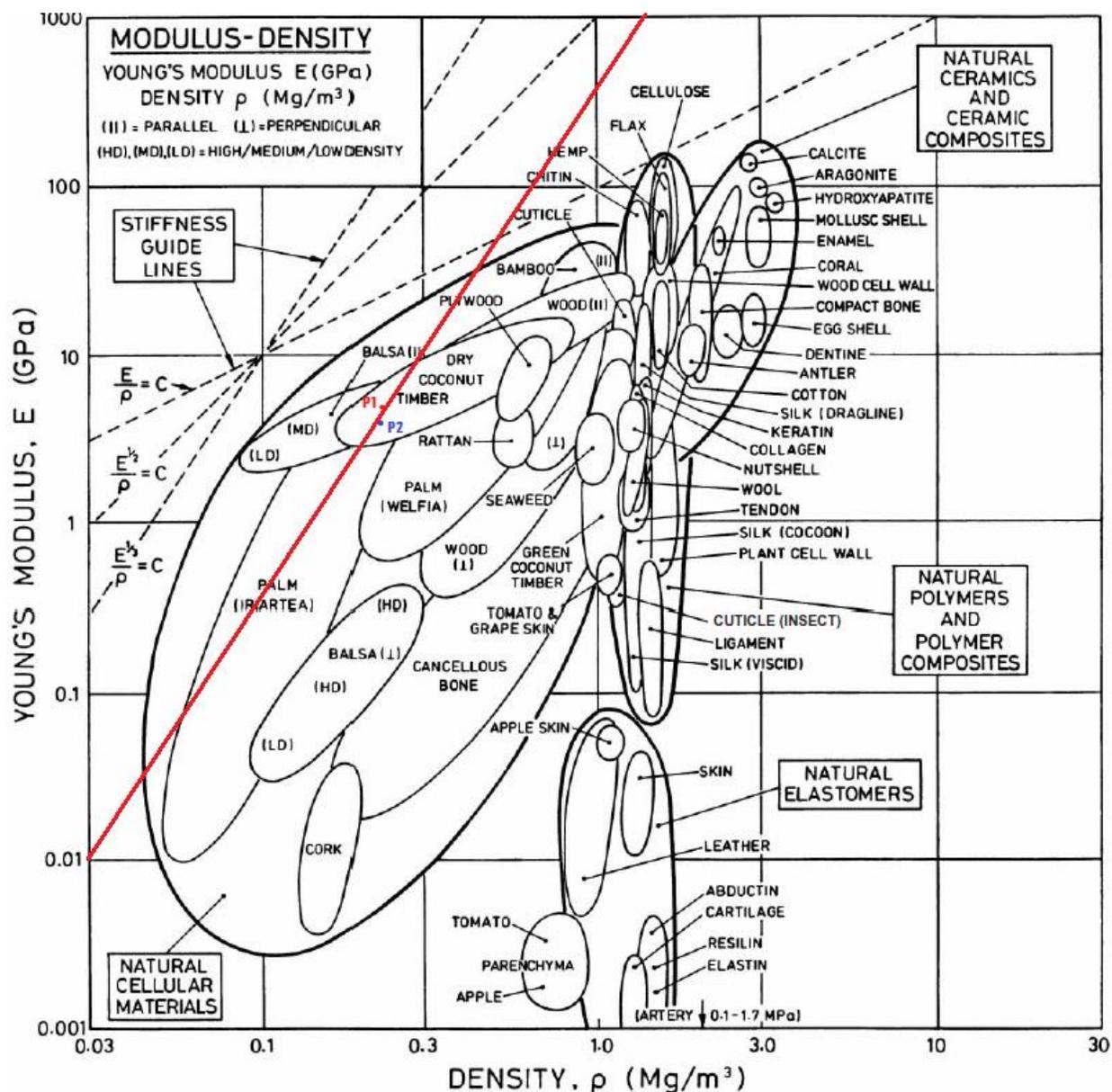


Figura 78 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en la gráfica que relaciona módulo de elasticidad contra densidad

Los puntos P1 y P2 identifican al prototipo 1 y 2 respectivamente, se sitúan en la Figura 78 y se traza la directriz de rendimiento $E^{1/3}/\rho$, lo que implica que su eficiencia mecánica en términos de la relación entre rigidez y densidad es superior a todos los

materiales que se ubican bajo la directriz, tal es el caso de el bambú, la palma y la madera en sentido perpendicular y paralelo a la fibra.

Los valores de índice de rendimiento de la Tabla 40, se compararon con los presentados por Ashby y Cebon (1993) en la investigación titulada "Materials selection in mechanical design" la misma que muestra valores de índice de rendimiento para distintos materiales como acero ($PI=0.74 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), plástico reforzado con fibra de vidrio ($PI=1.5 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), aleaciones de aluminio ($PI=1.6 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), vidrio ($PI=1.7 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), aleaciones de magnesio ($PI=1.9 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), polímero reforzado con fibra de carbono ($PI=3.0 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$), espuma de poliuretano ($PI=4.5 \text{ GPa}^{1/3}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$).

El resultado de la comparación expuso que la eficiencia mecánica característica de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en términos de rigidez por unidad mínima de masa es 8.30 veces mayor que el acero, 4.09 veces mayor al plástico reforzado con fibra de vidrio, 3.83 veces mayor que las aleaciones de aluminio, 3.61 veces mayor que el vidrio, 3.23 veces mayor que las aleaciones de magnesio, 2.05 veces mayor que el polímero reforzado con fibra de carbono y 1.36 veces mayor que la espuma de poliuretano.

Este rendimiento mecánico superior puede parecer irrelevante, pero en la naturaleza esta ventaja resulta crucial para las plantas al momento de sobrevivir o sucumbir. Además, Wegst y Ashby (2004) señalan que la madera, la palma y el bambú son particularmente eficientes en flexión y resistentes al pandeo, como lo indican los altos valores del índice de rendimiento $E^{1/3}/\rho$. El índice de rendimiento de la madera de balsa, por ejemplo, puede ser 5 veces mayor que el del acero.

5.3.3.2. Eficiencia mecánica a partir de la relación entre densidad y resistencia del material

Los resultados obtenidos al calcular el índice de rendimiento que relaciona la resistencia del material con la densidad (PI_2), se presentan en la Tabla 41.

Tabla 41

Índice de rendimiento (PI_2)

PROTOTIPO 1		
Fórmula	Valor	Unidad
$PI_2 = \frac{MOR^{\frac{1}{2}} (MPa)}{d \left(\frac{Mg}{m^3}\right)}$	17,23	$\frac{MPa^{\frac{1}{2}} * m^3}{Mg}$
PROTOTIPO 2		
Fórmula	Valor	Unidad
$PI_2 = \frac{MOR^{\frac{1}{2}} (MPa)}{d \left(\frac{Mg}{m^3}\right)}$	16,35	$\frac{MPa^{\frac{1}{2}} * m^3}{Mg}$

Los resultados de índice de rendimiento (PI_2) fueron $17.23 \text{ MPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ para el prototipo 1 y $16.35 \text{ MPa}^{1/2}\text{m}^3\text{Mg}^{-1}$ para el prototipo 2. Estos resultados se sitúan en la Figura 79 de la siguiente manera.

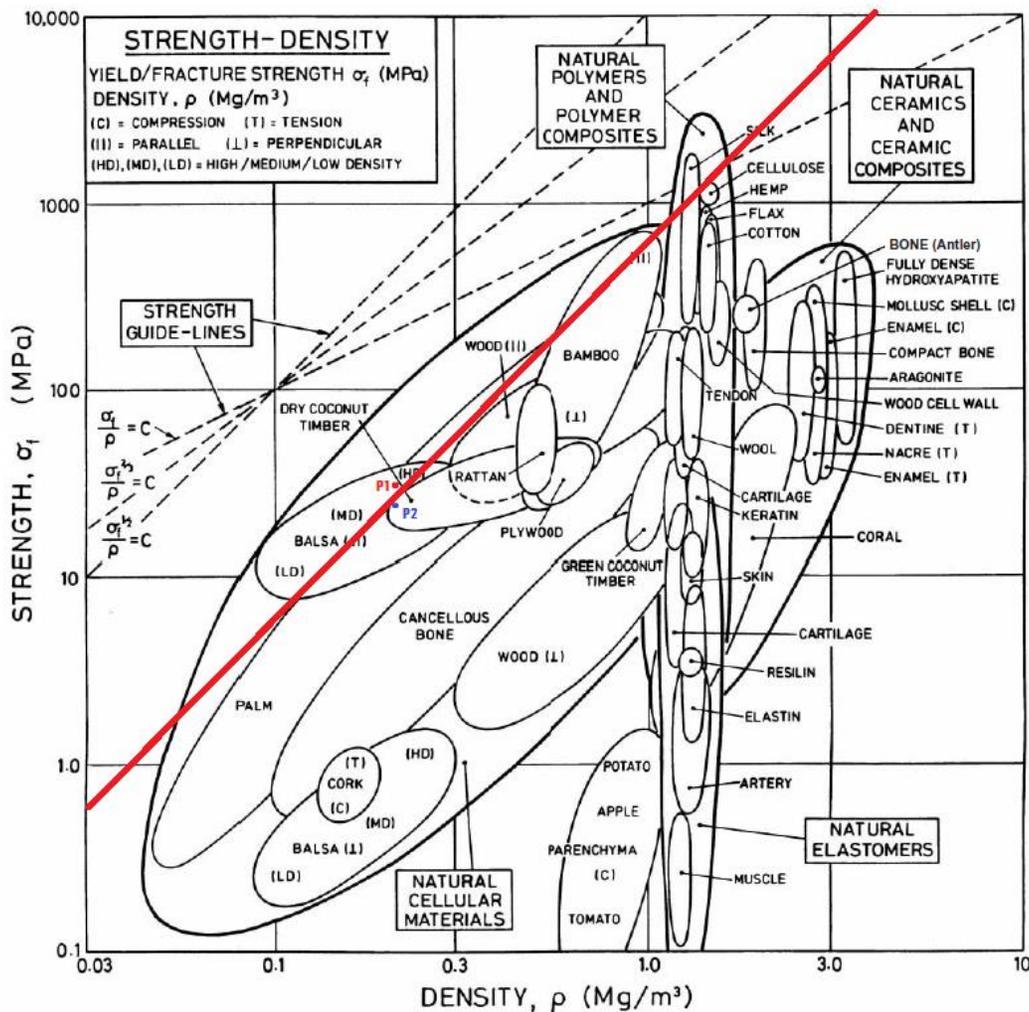


Figura 79 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en la gráfica que relaciona fuerza contra densidad de distintos materiales de ingeniería

Los puntos P1 y P2 representan al prototipo 1 y 2 respectivamente, estos se sitúan en la Figura 79 y se traza la directriz de rendimiento $\sigma^{1/2}/\rho$, lo que implica que su eficiencia mecánica en términos de la relación entre resistencia y densidad es comparable a la de ciertos materiales como el bambú, además de ser superior a todos los materiales que se encuentran debajo de ella. En términos de índice de rendimiento ($P1_2$) los prototipos de tablero estructural tipo sándwich no alcanzaron a ciertos materiales de

ingeniería como los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés). Pero pese a no poder igualarlos se tiene una alta eficiencia mecánica ante la aplicación de carga. Wegst y Ashby (2004) nos mencionan que el bambú, la palma y la madera al tener altos valores de índice de rendimiento (PI_2), brindan alta resistencia a la falla.

Los resultados de la investigación también muestran que la variación de distribución de densidad por esfuerzo de compresión da lugar a una alta eficiencia mecánica.

La razón de que ambos índices de rendimiento de los prototipos sean altos implica que el material del núcleo, pese a ser menos denso y resistente, contribuye a la eficiencia mecánica de la estructura.

En consecuencia, la combinación de material denso en la periferia de la estructura tipo sándwich con el material de núcleo menos denso permitió que su momento de inercia aumente y que esta estructura se comporte característicamente como una columna tubular de ingeniería en la que su momento de inercia aumenta considerablemente con poco peso.

CAPITULO VI

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TABLEROS PROPUESTOS Y COMPARACIÓN CON ELEMENTOS CONVENCIONALES

6.1. Cálculo de cargas admisibles en dirección axial

Los muros de corte en estructuras de madera pueden considerarse portantes y no portantes o autoportantes, según su función estructural. Los muros portantes tienen la capacidad de soportar cargas del techado o del piso superior, mientras que los muros autoportantes cumplen la función de dividir áreas o ser utilizados como cerramiento (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

Para el análisis de cargas admisibles en dirección uniaxial, se utilizó la ecuación de carga crítica de Euler presentada por Allen (1969) en su libro titulado "Analysis and design of structural sandwich panels". Se escogió trabajar con la carga crítica de pandeo de Euler, ya que es la carga axial máxima que soporta un elemento a compresión sin que produzca pandeo en el mismo. La Carga crítica de Euler estará dada por la Ecuación 26,

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * D}{L_{ef}^2} \quad (26)$$

donde, D es la suma de la rigidez a la flexión y se representan mediante la Ecuación 27,

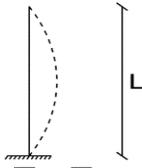
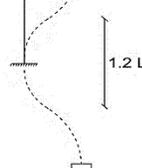
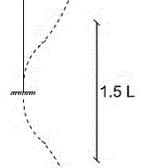
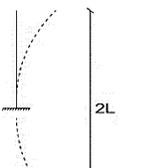
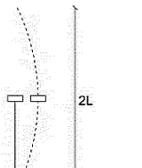
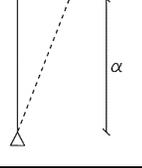
$$D = \left(Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B_1 \cdot dc^3}{12} \right) \quad (27)$$

en esta ecuación Ef es el módulo de elasticidad de los paneles externos (kg/cm^2), Ec es el módulo de elasticidad del panel de núcleo, B es el ancho medido del espécimen, f es el grosor del panel externo, dc es la profundidad del material del núcleo, e es la

profundidad medida entre los centroides de los paneles externos, L_{ef}^2 es la longitud teórica de una columna equivalente con articulaciones en sus extremos (longitud efectiva). Esta se obtiene multiplicando la longitud no arriostrada (L) por el factor de longitud efectiva (k), el cual se deriva de su condición de apoyo (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

En el caso específico de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich el factor de longitud efectiva es $k=1$, ya que se encuentra articulado en ambos extremos (véase Tabla 42).

Tabla 42
Longitud efectiva

Longitud Efectiva		<u>k</u>	<u>L_{ef}</u>	
<u>Condición de apoyo</u>				
1.	Articulado en ambos extremos.	1.0	L	
2.	Empotrado en un extremo (prevención del desplazamiento y rotación) y el otro impedido de rotar, pero libre de desplazarse.	1.2	1.2 L	
3.	Empotrado en un extremo y el otro parcialmente impedido de rotar, pero libre de desplazarse.	1.5	1.5 L	
4.	Empotrado en un extremo y libre en el otro.	2.0	2 L	
5.	Articulado en un extremo y el otro impedido de rotar, pero libre de desplazarse.	2.0	2 L	
6.	Articulado en un extremo y libre en el otro.		α	

El objetivo de realizar el análisis de cargas admisibles es determinar cuál será la carga que se puede aplicar en los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich sin que se produzcan fallas por pandeo. Este análisis es necesario debido a que el caso crítico en estructuras sometidas a carga uniaxial es el pandeo.

La carga máxima que soportaron los prototipos en las pruebas de laboratorio bajo el modo mecánico de compresión fue de 15173 kg para el prototipo 1 y 37730 kg para el prototipo 2.

Con el fin de dar una proyección certera de los resultados bajo el modo mecánico de compresión, se realiza el siguiente análisis teórico en el que se relaciona la carga admisible con la geometría del tablero estructural tipo sándwich.

En la Figura 80 se presentan dos tableros de distintas dimensiones, el primero corresponde a la muestra que se utilizó para determinar el esfuerzo en laboratorio, para este caso se la identificará como 1; junto a esta se encuentra el tablero estructural tipo sándwich que será utilizado en construcción, en este caso lo identificaremos como 2. Se debe acotar que, aunque las dimensiones de ancho y alto varíen el espesor se mantendrá, debido a que se realiza el análisis para el mismo prototipo de tablero estructural tipo sándwich.

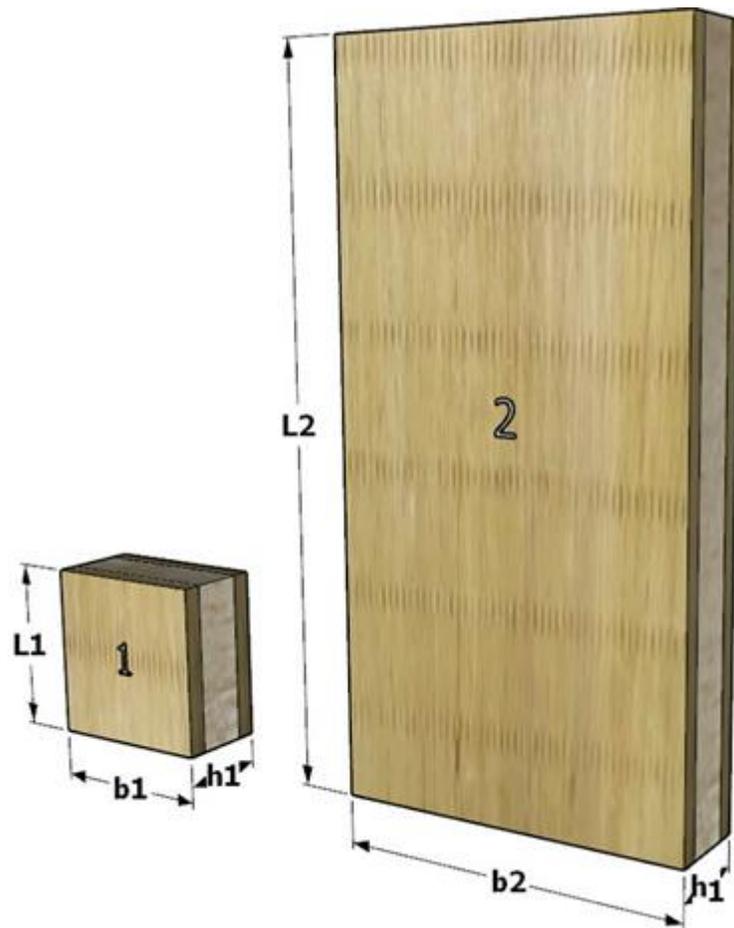


Figura 80 Muestra ensayada en laboratorio (1), prototipo de tablero estructural tipo sándwich dimensiones estándar (2).

Para iniciar el análisis se establece la ecuación de carga crítica de Euler para cada geometría (ver Ecuación 26).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * D}{L_{ef}^2} \quad (26)$$

En la Ecuación 26 se procede a reemplazar la Ecuación 27 y se obtiene la Ecuación 28 que es la ecuación de carga crítica de Euler para tableros estructurales tipo sándwich con todos sus datos presentados.

$$P_E = \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B \cdot dc^3}{12} \right) \quad (28)$$

En base a la Ecuación 28 se establecen las Ecuaciones 29 y 30 para carga crítica de Euler de cada uno de los prototipos presentados en la Figura 80

$$P_{E1} = \frac{\pi^2}{L_1^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B_1 \cdot dc^3}{12} \right) \quad (29)$$

$$P_{E2} = \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B_2 \cdot dc^3}{12} \right) \quad (30)$$

Si bien estas ecuaciones pertenecen a distintos prototipos existen datos que se mantienen constantes, uno de ellos es el módulo de elasticidad del panel de núcleo de balsa Ec , por lo tanto, se procede a despejar este valor de la Ecuación 29, obteniendo la Ecuación 31.

$$\begin{aligned} \frac{P_{E1} \cdot L_1^2}{\pi^2} &= Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B_1 \cdot dc^3}{12} \\ Ec \cdot \frac{B_1 \cdot dc^3}{12} &= \frac{P_{E1} \cdot L_1^2}{\pi^2} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} \\ Ec &= \frac{12}{B_1 \cdot dc^3} \cdot \left(\frac{P_{E1} \cdot L_1^2}{\pi^2} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

El último paso es reemplazar la Ecuación 31 en la Ecuación 30, para encontrar la Ecuación 32 que se utilizará para determinar la carga crítica admisible en el prototipo dos.

$$\begin{aligned} P_{E2} &= \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f \cdot e^2}{2} + Ec \cdot \frac{B_2 \cdot dc^3}{12} \right) \quad (30) \\ P_{E2} &= \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f \cdot e^2}{2} + \left(\frac{12}{B_1 \cdot dc^3} \cdot \left(\frac{P_{E1} \cdot L_1^2}{\pi^2} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} - Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} \right) \right) \cdot \frac{B_2 \cdot dc^3}{12} \right) \\ P_{E2} &= \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f^3}{6} + Ef \cdot \frac{B_2 \cdot f \cdot e^2}{2} + \left(\frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_{E1} \cdot L_1^2}{\pi^2} - \frac{B_2}{B_1} \cdot Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f^3}{6} - \frac{B_2}{B_1} \cdot Ef \cdot \frac{B_1 \cdot f \cdot e^2}{2} \right) \right) \end{aligned}$$

$$P_{E2} = \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(\frac{Ef \cdot B_z \cdot f^3}{6} + \frac{Ef \cdot B_z \cdot f \cdot e^2}{2} + \left(\frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{PE_1 \cdot L_1^2}{\pi^2} - \frac{Ef \cdot B_z \cdot f^3}{6} - \frac{Ef \cdot B_z \cdot f \cdot e^2}{2} \right) \right)$$

$$P_{E2} = \frac{\pi^2}{L_2^2} \cdot \left(\frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{PE_1 \cdot L_1^2}{\pi^2} \right)$$

$$P_{E2} = \frac{PE_1 \cdot B_2 \cdot L_1^2}{B_1 \cdot L_2^2} \quad (32)$$

La Ecuación 32 será utilizada para determinar la carga admisible de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de medidas estándar en base a las pruebas de laboratorio realizadas. Utilizando la Ecuación 32 se presentan las Tablas 45 y 46 de carga admisible para distintos tableros estructurales tipo sándwich elaborados en base a paneles exteriores de láminas de melina y un panel de núcleo de balsa.

6.2. Cálculo de cargas admisibles en dirección lateral

Cada muro de corte por separado, debe tener la capacidad de resistir carga lateral proporcional a la generada por el peso que se aplica sobre él. Las fuerzas cortantes laterales que se aplican sobre los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich se deben a las generadas por sismo o por viento y se determinan a partir de los reglamentos autónomos de cada territorio (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

Para determinar cuál es la carga admisible que se puede aplicar a los prototipos de tablero estructural tipo sándwich se debe partir determinando la rigidez que este posee ante cargas laterales, para esto se realizó una modelación del material en el programa Structural Software for Analysis and Design (SAP 2000).

Se calculará la rigidez lateral del prototipo de tablero estructural tipo sándwich la cual mide la capacidad que tiene el prototipo para soportar cargas sin deformarse

(Terradillos López, 2018). La rigidez lateral será definida como la fuerza que necesita ser aplicada lateralmente para que el prototipo de tablero estructural tipo sándwich se deforme 1 cm.

El procedimiento que se siguió fue modelar el prototipo en el programa SAP 2000 v19 y aplicar cargas laterales hasta encontrar una deformación de 1 cm. El modelo se presenta en la Figura 81.

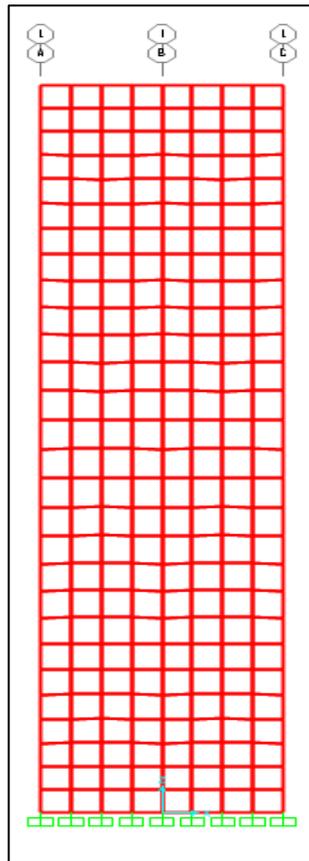


Figura 81 Modelo del tablero estructural tipo sándwich elaborado en el programa SAP 2000

La geometría que tuvo el modelo fue lo más apegada a la realidad, es decir, que se utilizaron las dimensiones que tendrá al momento de ser colocado en obra. Por lo tanto, será de 240 cm de altura, 60 cm de ancho y el espesor variará dependiendo del prototipo. Estas dimensiones se escogieron en base al buen uso del material, es decir que se adoptan estas medidas por el hecho de que realizar otra geometría provocaría perdidas por material ya que existirían sobrantes que no se utilizarían.

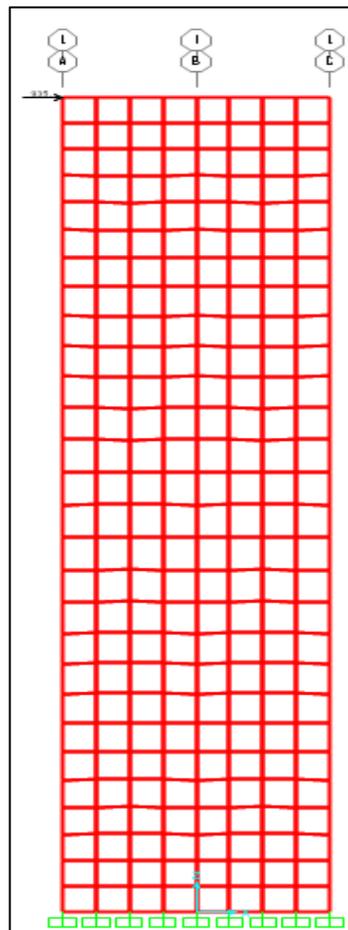
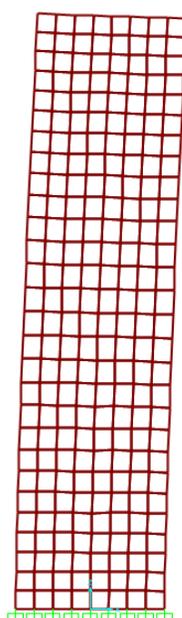


Figura 82 Modelación de fuerza lateral puntual aplicada al tablero estructural tipo sándwich elaborado en el programa SAP 2000

La Figura 82 presenta el modelo una vez que se le aplica carga, para este caso específico se aplicó en sentido horizontal, una vez que la carga es aplicada el modelo sufre deformación en el sentido que se aplicó la fuerza, el modelo deformado es similar en todos los casos de modelación ya que no se está buscando el esfuerzo máximo sino determinar la rigidez para 1 cm de deformación (véase Figura 83).

(a)



(b)

Joint Displacements			
Joint Object	4	Joint Element 4	
	1	2	3
Trans	1,	0,	0,11674
Rotn	0,	0,00741	0,

Figura 83 Resultados modelación de elementos finitos en SAP 2000, (a) Deformación del modelo una vez aplicada la carga, (b) cuadro de resultados por nudo elaborado por el programa SAP 2000.

En cada modelo se determinó que la deformación sea de 1 cm verificando en tablas de desplazamientos como la que se muestra en la Figura 83 (b).

Una vez que se determina la rigidez lateral de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich, se procede a derivar la carga lateral admisible que puede soportar el elemento.

Para esto se inicia la derivación a partir de la ley de Hooke (ver Ecuación 4) para elementos que trabajan en el rango elástico, y la Ecuación 33 para determinar el esfuerzo en dirección de aplicación de carga,

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (33)$$

donde σ será el esfuerzo en la dirección de aplicación de carga, E el módulo de elasticidad del prototipo de tablero estructural tipo sándwich (kg/cm^2), F es la carga aplicada (kg) y A es el área de la carga de aplicación en (cm^2).

La deducción parte de la ley de Hooke reemplazando el valor de la deformación unitaria ε por su definición dada por la Ecuación 34,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (34)$$

donde ΔL es la variación de deformación (Meza et al.) y L es la longitud inicial total en la se producirá la deformación (Meza et al.).

Reemplazando la Ecuación 34 en la Ecuación 4 tenemos la Ecuación 35 que expresa el valor del esfuerzo en función de su módulo de elasticidad (E), su variación de deformación (ΔL) y su longitud (L).

$$\sigma = \frac{E * \Delta L}{L} \quad (35)$$

A partir de este punto se realizará una serie de pasos hasta llegar a la expresión a utilizarse para determinar la rigidez y a partir de la carga admisible (ver Ecuación 36). El proceso se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{F}{A} &= \frac{E * \Delta L}{L} \\ F &= \frac{E * A * \Delta L}{L} \\ F &= \frac{E * A}{L} * \Delta L \\ F &= k * \Delta L \\ k &= \frac{E * A}{L} \end{aligned} \quad (36)$$

Una vez determinada la expresión de rigidez se despeja el valor de la carga admisible (ver Ecuación 37) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} k &= \frac{E * A}{L} \\ k &= \frac{E * \frac{F}{\sigma}}{L} \\ k &= \frac{E * F}{\sigma * L} \end{aligned}$$

$$F = \frac{k * \sigma * L}{E} \quad (37)$$

Después de realizar el despeje presentado anteriormente se llega a la Ecuación 37, que se utiliza para determinar la carga admisible lateral en prototipos de tablero estructural tipo sándwich. Esta será utilizada en las siguientes secciones para elaborar una tabla general de propiedades de los distintos prototipos.

6.3. Propuesta de tableros de diferentes espesores

Con la finalidad de dar una gama de posibilidades al sector de la construcción se determinó teórica y numéricamente una propuesta de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de diferentes espesores.

Para esto se propuso no variar los espesores de los paneles de núcleos de balsa, por cuestiones de producción y desarrollo, es decir, que las dimensiones de 4 cm y 8.9 cm de espesor que tenían los paneles de núcleo de balsa para el prototipo 1 y el prototipo 2 respectivamente, se mantendrán.

Se variará entonces las láminas de melina desde 7 láminas por lado hasta un máximo de 14 láminas, para ambos núcleos de balsa. Obteniendo de esta manera 14 tipos de tableros de diferentes espesores y diferentes características mecánicas.

Al final de la Sección 6.4 se presentará una tabla resumen en la que se incluirá la carga admisible axial, carga admisible lateral, rigidez lateral, el peso y sus dimensiones.

6.4. Memoria de cálculo

En las Secciones 6.1, 6.2 y 6.3 se ha presentado la teoría necesaria para establecer las características requeridas de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich. Con el objeto de aclarar el procedimiento de cálculo de cada tablero se opta por hacer una memoria de cálculo de uno de los paneles, para ejemplificar la forma en que se ha obtenido los resultados de cada prototipo.

6.4.1. Carga admisible en dirección axial

Las características geométricas y mecánicas necesarias para iniciar el cálculo de la carga admisible en dirección uniaxial se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43

Datos para el cálculo de carga axial admisible

Datos	Prototipo de laboratorio (1)	Prototipo estándar (2)
b (Meza et al.)	20,00	60,00
Lef (Meza et al.)	20,00	240,00
h (Meza et al.)	7,43	7,43
Condición de apoyo (k)	1,00	1,00
Pcr (kg)	16395,56	

Las dimensiones presentadas en la Tabla 43 se refieren a las de la Figura 80 presentada en la Sección 6.1. Los datos que presenta la Tabla 43 son correspondientes a un prototipo de tablero estructural tipo sándwich de 4 cm de núcleo y 7 láminas de melina por lado.

El procedimiento para determinar la carga axial admisible previo a la falla por pandeo se realiza en base a la Ecuación 32.

$$P_{E2} = \frac{P_{E1} \cdot L_1^2 \cdot B_2}{B_1 \cdot L_2^2} \quad (32)$$

En la Ecuación 32 se reemplazan los datos presentados en la Tabla 43 y se determina el valor de la carga admisible uniaxial.

$$P_{cr_2} = \frac{16395.56 \text{ kg} \cdot (20 \text{ cm})^2 \cdot (60 \text{ cm})}{(20 \text{ cm}) \cdot (240 \text{ cm})^2}$$

$$P_{cr_2} = 341.57 \text{ kg}$$

Esta será la carga que resiste un panel de 60 cm de ancho, para obtener el valor que puede soportar el prototipo por metro, se divide la carga P_{cr_2} para 0.60 m y se obtiene la verdadera carga por metro lineal del muro.

$$P_{cr_2} = \frac{341.57 \text{ kg}}{0.60 \text{ m}} = 569.29 \text{ kg/m}$$

De esta manera se consigue la carga admisible axial para los prototipos de tablero estructural tipo sándwich de medidas reales en base a los resultados de laboratorio.

6.4.2. Carga admisible lateral

Al momento de obtener la carga admisible lateral de los tableros estructurales tipo sándwich se debe establecer los datos que serán reemplazados en la Ecuación 37 presentada en la sección 6.2. Por consiguiente, se presenta la Tabla 44 con los datos

necesarios para determinar la carga admisible lateral de un prototipo estructural tipo sándwich, con un núcleo de 4 cm de espesor y 7 láminas de melina por lado.

Tabla 44

Datos para el cálculo de carga lateral admisible

Datos	Valor	Unidad
Esfuerzo a compresión (σ)	239,00	kg/cm ²
Longitud de deformación (L)	60,00	cm
Módulo de elasticidad (E)	54734,49	kg/cm ²
Rigidez lateral (k)	935,98	kg/cm ²

Los datos presentados en la Tabla 44, serán reemplazados en la Ecuación 37, para determinar la carga lateral admisible del prototipo mencionado.

$$F = \frac{k * \sigma * L}{E} \quad (37)$$

$$F = \frac{\left(935.98 \frac{kg}{cm}\right) * \left(239 \frac{kg}{cm^2}\right) * 60 \text{ cm}}{\left(54734.49 \frac{kg}{cm^2}\right)}$$

$$F = 245.22 \text{ kg}$$

La carga lateral para un prototipo con 240 cm de alto, 60 cm de ancho y 7.43 cm de espesor es de 245.22 kg, para determinar la carga lateral admisible por metro se divide el valor F para 0.60 m y se consigue el valor de carga admisible lateral por metro.

$$F = \frac{245.22 \text{ kg}}{0.60 \text{ m}} = 408.70 \text{ kg/m}$$

Este será el procedimiento a aplicar para determinar la carga lateral admisible en los prototipos de tablero estructural tipo sándwich.

6.4.3. Resumen de características de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de diferentes espesores

Una vez que se ha desarrollado el procedimiento de cálculo de carga axial admisible y carga lateral admisible se puede presentar las Tablas 45 y 46. La Tabla 45 presenta los resultados para prototipos de diferentes espesores cuyo núcleo de balsa tiene un espesor de 4 cm, mientras que la Tabla 46 muestra los resultados obtenidos para prototipos de diferentes espesores cuyo núcleo de balsa tiene un espesor de 8.9 cm.

Tabla 45

Prototipos de tableros estructurales tipo sándwich (Núcleo de balsa = 4 cm)

# capas de melina/lado	Espesor cm	Largo cm	Ancho cm	Carga axial admisible kg/m	Rigidez Lateral kg/cm/m	Carga lateral admisible kg/m	Peso Kg/m	PI ₁ (GPa ^{1/3} m ³)/Mg	PI ₂ (MPa ^{1/2} m ³)/Mg
7	7,43	240,00	60,00	569,29	1559,96	408,70	50,11	6,23	17,23
8	7,92	240,00	60,00	653,33	1634,79	434,20	53,26	6,22	16,72
9	8,41	240,00	60,00	741,75	1709,30	460,33	56,39	6,21	16,28
10	8,90	240,00	60,00	834,58	1783,62	487,14	59,50	6,20	15,90
11	9,39	240,00	60,00	931,79	1858,74	514,95	62,60	6,19	15,56
12	9,88	240,00	60,00	1033,40	1933,82	543,56	65,67	6,18	15,26
13	10,37	240,00	60,00	1139,40	2008,76	572,97	68,73	6,16	14,99
14	10,86	240,00	60,00	1249,80	2084,22	603,41	71,77	6,15	14,74

Tabla 46

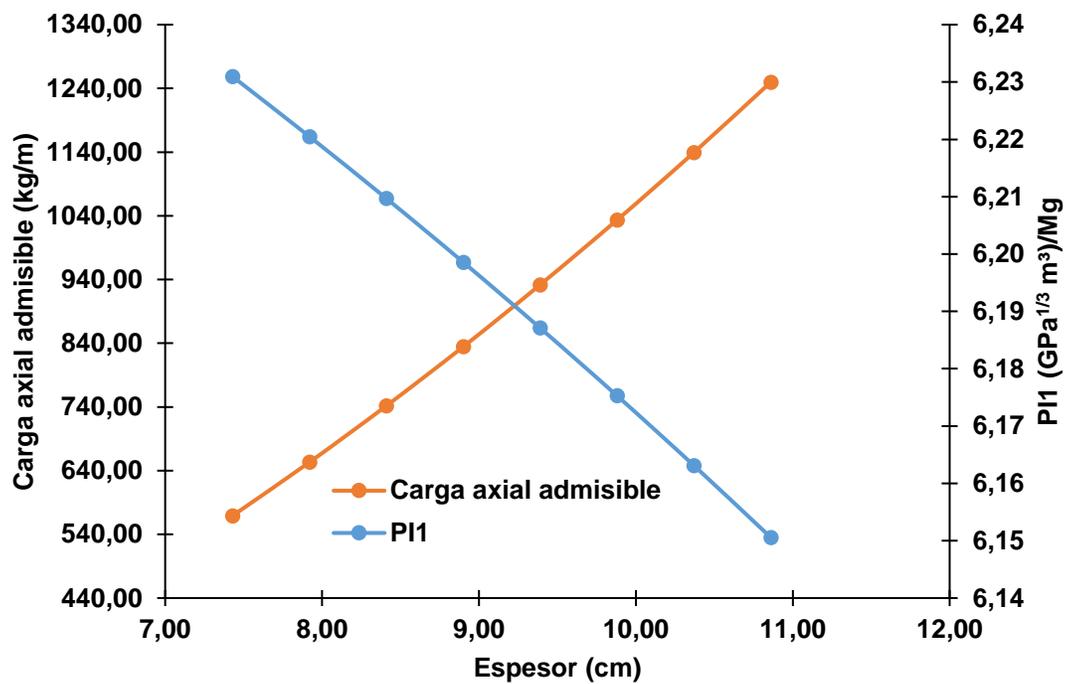
Prototipos de tableros estructurales tipo sándwich (Núcleo de balsa =8.9 cm)

# capas de melina/ lado	Espesor cm	Largo cm	Ancho cm	Carga axial admisible kg/m	Rigidez Lateral kg/cm/m	Carga lateral admisible kg/m	Peso Kg/m	PI ₁ (GPa ^{1/3} m ³ /Mg)	PI ₂ (MPa ^{1/3} m ³ /Mg)
7	12,33	240,00	60,00	1249,80	2084,42	505,42	81,48	6,15	20,84
8	12,82	240,00	60,00	1364,59	2158,85	531,44	84,47	6,14	19,86
9	13,31	240,00	60,00	1483,77	2233,96	558,44	87,44	6,12	19,06
10	13,80	240,00	60,00	1607,35	2309,96	586,51	90,39	6,11	18,37
11	14,29	240,00	60,00	1735,31	2384,33	615,06	93,33	6,10	17,79
12	14,78	240,00	60,00	1867,68	2458,71	644,54	96,24	6,08	17,28
13	15,27	240,00	60,00	2004,43	2534,52	675,37	99,14	6,07	16,83
14	15,76	240,00	60,00	2145,58	2608,90	706,84	102,01	6,05	16,35

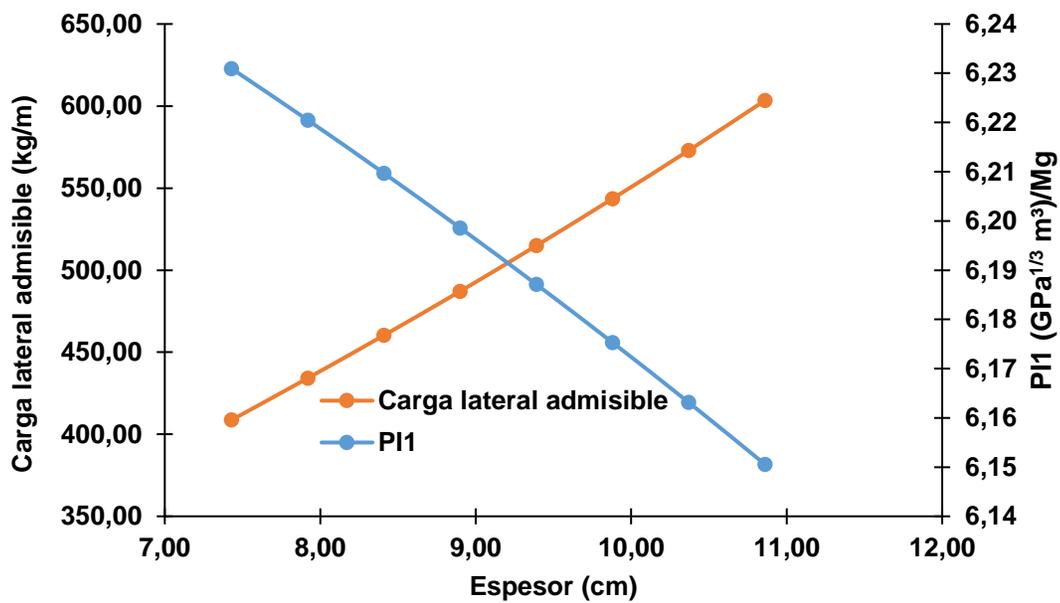
Las Tablas 45 y 46 están destinadas a ser utilizadas al momento de realizar el diseño estructural, por el método diseño por esfuerzos admisibles (ASD por sus siglas en inglés).

Los resultados presentados en las Tablas 45 y 46 se han graficado en las Figuras 84 y 85 para que facilite el uso de los cálculos establecidos, al momento de solicitar determinado tipo de tablero estructural tipo sándwich.

(a)

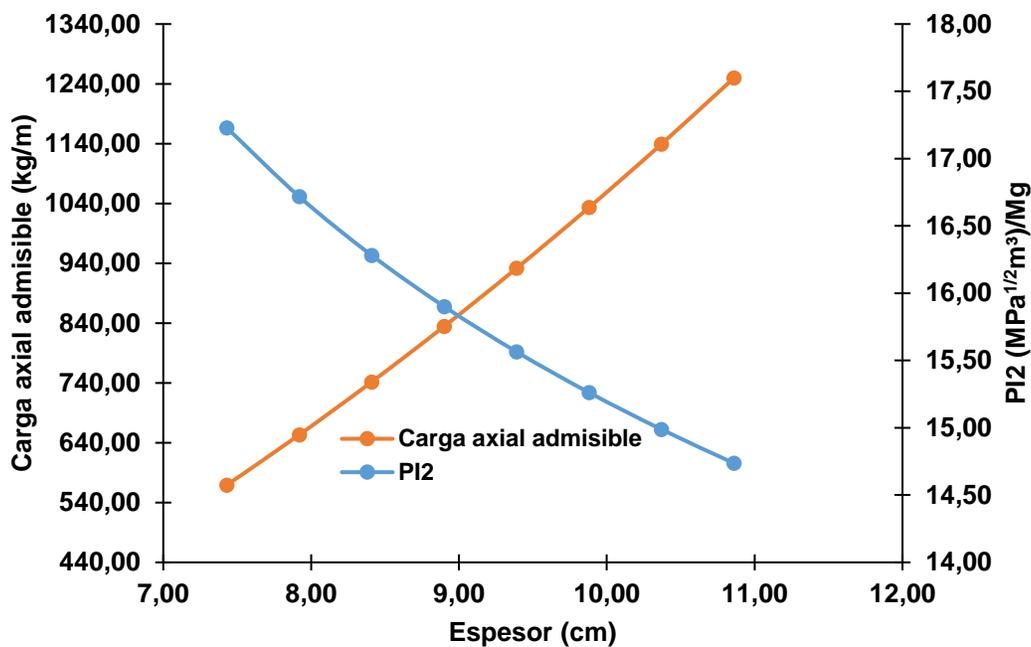


(b)



CONTINÚA→

(c)



(d)

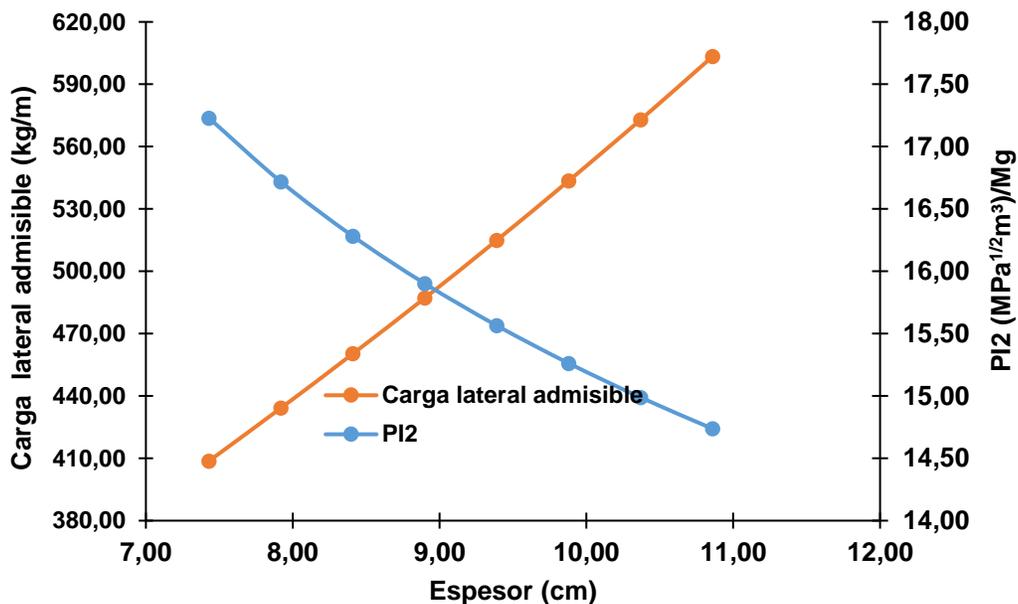
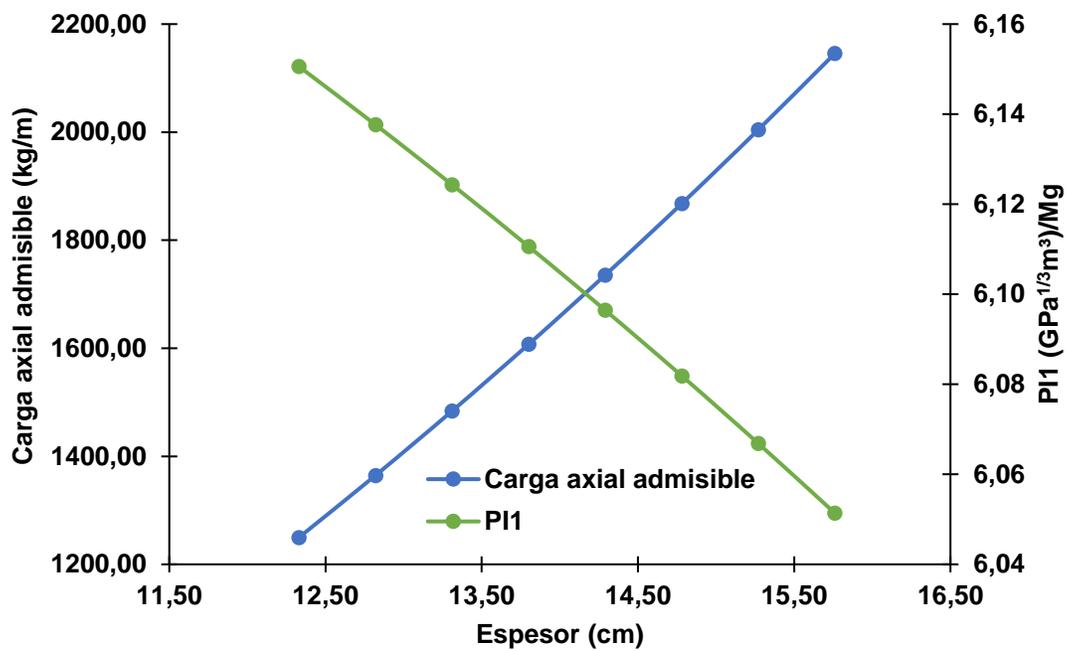
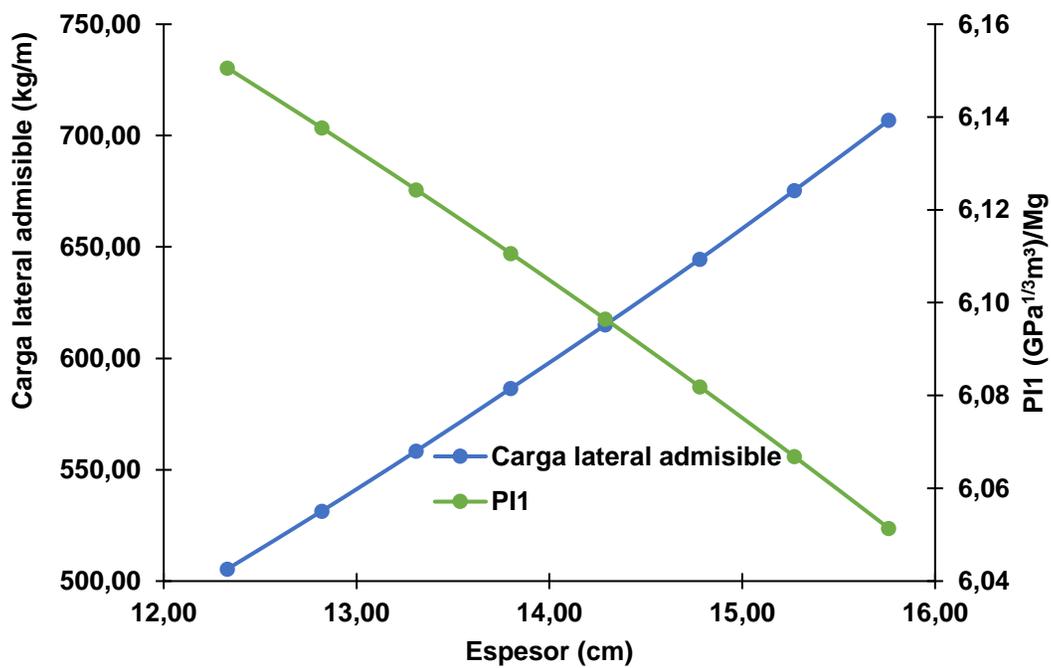


Figura 84 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con panel de núcleo de balsa de 4 cm de espesor, (a) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI1), (b) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI1), (c) carga axial admisible vs vs índice de rendimiento (PI2), (d) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI2)

(a)

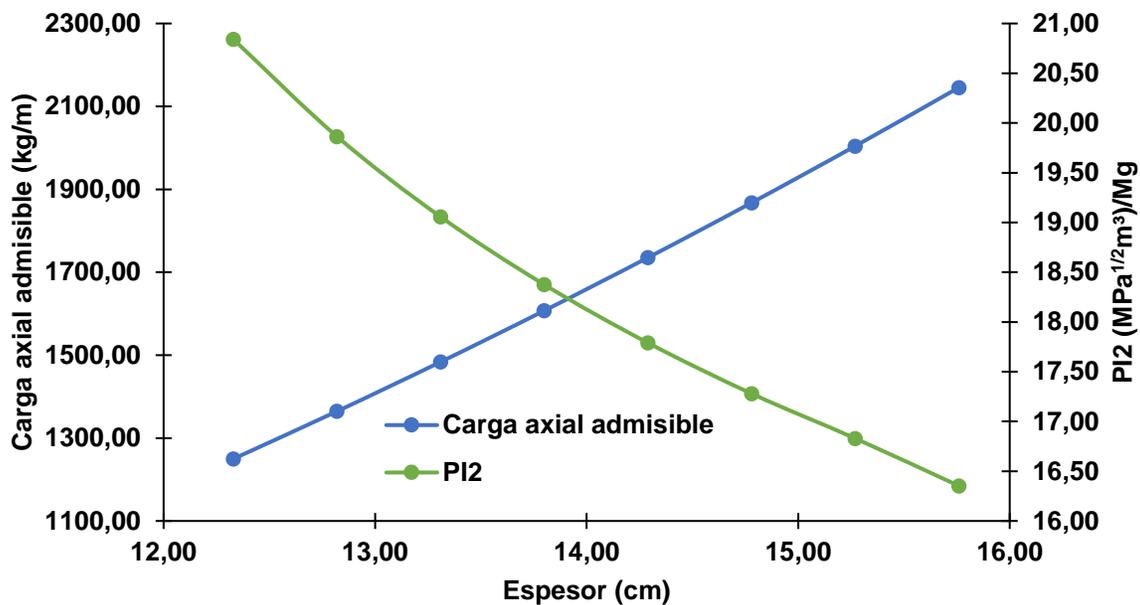


(b)



CONTINÚA→

(c)



(d)

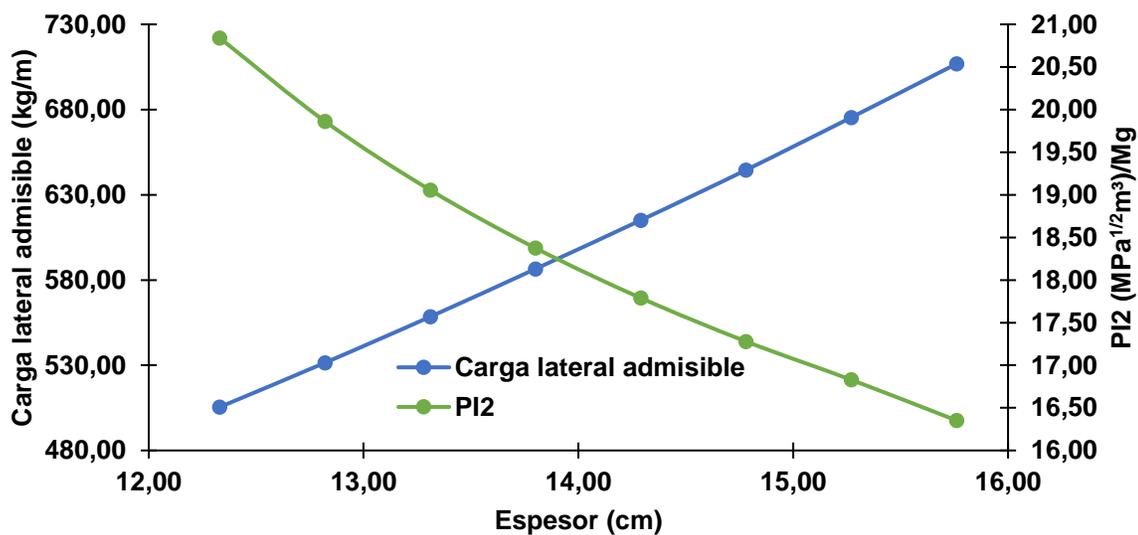


Figura 85 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con panel de núcleo de balsa de 8.9 cm de espesor, (a) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI1), (b) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI1), (c) carga axial admisible vs índice de rendimiento (PI2), (d) carga lateral admisible vs índice de rendimiento (PI2)

6.5. Costos referenciales

Se obtuvo el costo de los prototipos iniciales en base al precio de producción de cada elemento, estos datos fueron proporcionados por la empresa 3A Composites, a través de sus sub empresas internas Plantabal S.A y Banova. Los precios que maneja esta empresa se presentan por metro cúbico, es decir que se manejan por lote. Debido a lo anterior se realizó el cálculo para el volumen de cada material ocupado por prototipo. Las Tablas 47 y 48 presentan el cálculo de costo por metro cuadrado de cada prototipo, determinando el valor por la elaboración de cada uno de sus elementos.

Tabla 47

Costo por metro cuadrado de tablero estructural tipo sándwich. Prototipo 1

Prototipo 1	Dimensiones			Volumen m ³	Costo \$/m ³	Costo total \$/m ²
	Ancho	Largo	Espesor			
	m	m	m			
Panel de núcleo de balsa	1,000	1,000	0,043	0,043	480,00	20,64
Panel exterior de melina	1,000	1,000	0,034	0,034	520,00	17,68
Costo de unión por m ³				0,077	50,00	3,85
Total						42,17

Tabla 48

Costo por metro cuadrado de tablero estructural tipo sándwich. Prototipo 2

Prototipo 2	Dimensiones			Volumen m ³	Costo \$/m ³	Costo total \$/m ²
	Ancho	Largo	Espesor			
	m	m	m			
Panel de núcleo de balsa	1,000	1,000	0,089	0,089	480,00	42,72
Panel exterior de melina	1,000	1,000	0,068	0,068	520,00	35,36
Costo de unión por m ³				0,157	50,00	7,85
Total						85,93

La Tabla 47 presenta el costo por metro cuadrado del prototipo 1 de tablero estructural tipo sándwich cuyo valor es de 42,17 \$/m², por otra parte, la Tabla 48 presenta un valor de 85,93 \$/m² para el prototipo 2.

Se debe tener en cuenta que este es el costo de realizar un prototipo, por lo tanto, este valor se verá disminuido aproximadamente en un 10 % al momento de industrializar el producto y elaborarlo en masa, ya que se mejorarán los procesos y se disminuirán tiempos de producción obteniendo precios finales de producción de 37.95 \$/m² para el prototipo 1 y un valor de 77.34 \$/m² para el prototipo 2.

6.6. Comparación con materiales convencionales

6.6.1. Comparación con materiales convencionales por su costo

Un factor importante para tomar en cuenta en la utilización de los tableros estructurales tipo sándwich es el costo comparado con materiales utilizados tradicionalmente en las paredes de construcciones civiles de Ecuador, estos son: (i) ladrillos macizos, (ii) ladrillo cara vista, (iii) bloques huecos de hormigón, (iv) panel gypsum inyectado con poliuretano y (v) tabla triplex. La Tabla 49 presenta el costo por metro cuadrado de los precios en el mercado de los materiales antes mencionados.

Tabla 49
Costo por metro cuadrado de materiales tradicionales

Material	Volumen
	\$/m ²
Ladrillo macizo (13x7x29)	68.80
Ladrillo cara vista 4H (19x07x29)	41.28
Bloque rayado (13x20x40)	12.25
Panel de gypsum exterior inyectado poliuretano	23.22
Tabla triplex 18mm	20.23

En la Figura 86 se realiza una comparación visual de los materiales tradicionales con ambos prototipos de tableros estructurales tipo sándwich estudiada en esta investigación.

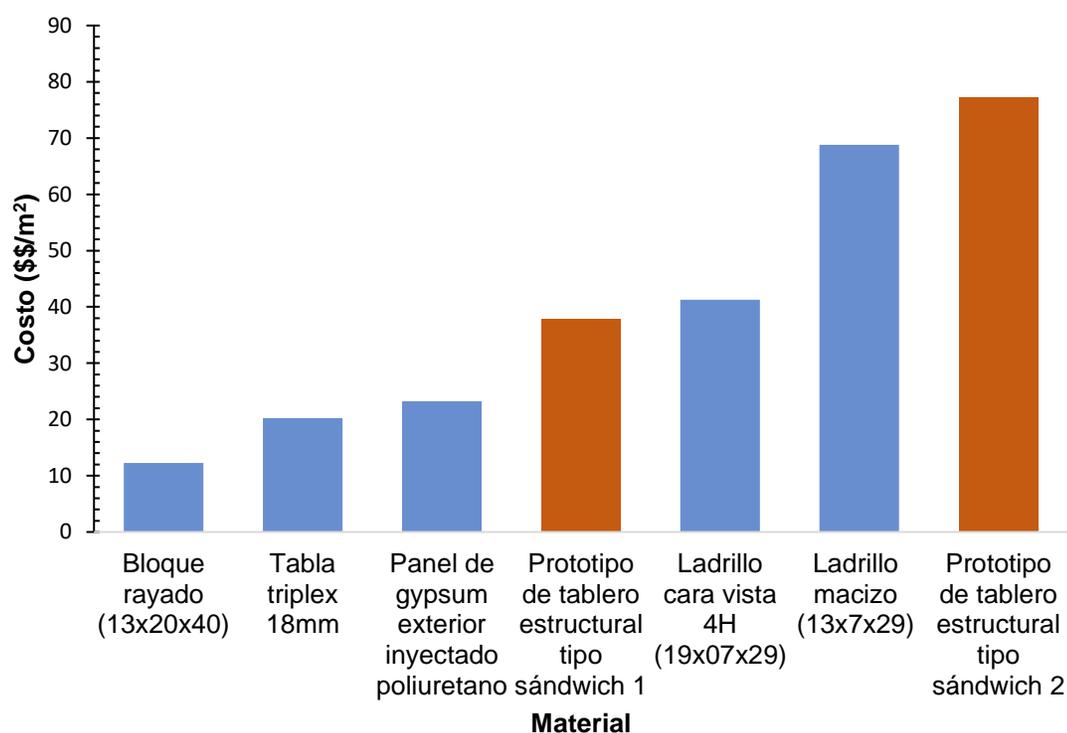


Figura 86 Costo por metro cuadrado de materiales tradicionales y prototipos propuestos

Se puede apreciar en la Figura 86, que todos los materiales convencionales son más baratos que el Prototipo 2, mientras que para el Prototipo 1 solo el ladrillo es más costoso. Aunque en ambos casos es notable la diferencia en cuanto a precios, al analizar otros factores de los tableros estructurales tipo sándwich, como su reducción en peso y un menor tiempo de construcción, esto reflejará un menor costo final de la obra.

Aunque todos los materiales convencionales sean más baratos que los prototipos propuestos, estos solo resisten esfuerzos a compresión y no presentan todas las ventajas en cuanto a propiedades mecánicas de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich, ante estas ventajas es claro que el aumento de costo frente a materiales convencionales está más que justificado.

6.6.2. Comparación con materiales convencionales por su densidad

En el presente estudio se llevó a cabo una pequeña demostración de cuan conveniente sería empezar a construir con prototipos de tableros estructurales tipo sándwich como de los que se habla en esta investigación. Es por esto que se realizó la comparación en cuestión de densidad frente a uno de sus mejores competidores en el mercado “el bloque”.

Se elaboraron paredes de bloque de manera tradicional, cuyas medidas fueron de 64 cm x 64 cm x 15 cm, estos muros pequeños no fueron enlucidos y se mantuvieron a la intemperie durante un mes, estos muros se presentan en la Figura 87.



Figura 87 Paredes de bloque en intemperie

Como medida de comparación se tomó su densidad la cual afecta de diversas maneras en el ámbito de la construcción, ya que, debido a la variación de este valor, se puede acrecentar o disminuir el costo de una obra, además influye también en los rendimientos de obra ya que al ser más denso el material, es más difícil llevar cabo la elaboración de paredes.

Por esta razón se procedió a medir y pesar cada pared (véase Figura 88) para determinar su densidad.



Figura 88 Medición y pesado de cada una de las paredes de bloque

La densidad se calculó en base a la Ecuación 38,

$$p = \frac{w}{v} \quad (38)$$

donde w es el peso de la pared (kg) y v es el volumen de la misma (m^3). La densidad se calculó para las dos paredes y los resultados se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50*Densidad de paredes de bloque*

Pared	Largo m	Ancho m	Espesor m	Volumen m³	Peso kg	Densidad kg/m³
Pared 1	0,64	0,64	0,15	0,06	73,00	1188,15
Pared 2	0,64	0,65	0,15	0,06	70,00	1121,79

La densidad de la pared de bloque que se utilizará para realizar la comparación con los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich será el promedio de los resultados presentados en la Tabla 50. El valor de densidad de la pared será de 1154.97 kg/m³.

Tabla 51*Comparación de pesos por metro cuadrado*

Prototipos	Espesor m	Volumen m³	Densidad seca kg/m³	Peso/m² kg/m²
Prototipo de tablero estructural tipo sándwich 1	0,07	0,07	281,00	20,88
Prototipo de tablero estructural tipo sándwich 2	0,16	0,16	269,70	42,50
Pared de bloque	0,15	0,15	1154,97	173,25

El peso presentado en la Tabla 51 es para un metro cuadrado de cada prototipo, basándose en los resultados presentados por la Tabla 51 se puede ver que los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich son aproximadamente 4 y 8 veces más livianos que la mampostería tradicional. Mediante este análisis se puede comprobar que al utilizar tableros estructurales tipo sándwich el peso de la estructura disminuirá y esto provocará; (i) reducción de costos de obra, (ii) disminución de tiempos de construcción y (iii) reducción de la huella ambiental.

6.6.3. Comparación con materiales convencionales por su resistencia

Los materiales que se compararán con los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich serán los utilizados tradicionalmente en las construcciones civiles de Ecuador, estos son: (i) bloques huecos de hormigón y (ii) ladrillos cerámicos. Los datos necesarios para la comparación serán tomadas de dos fuentes; (i) Tabla 5 de la norma NTE INEN 3066 Bloques de hormigón: Requisitos y métodos de ensayo (ver Tabla 52), (ii) Tabla 1 de la norma NTE INEN 297 Ladrillos cerámicos: Requisitos (ver Tabla 53).

Tabla 52
Resistencia mínima del bloque a compresión simple

Descripción	Resistencia neta mínima a la compresión simple (MPa)		
	Clase A	Clase B	Clase C
	Promedio de 3 bloques	13,8	4,1
Por bloque	12,4	3,5	1,4

Fuente: (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2014)

Tabla 53
Datos de resistencia de distintos tipos de ladrillos

Tipo de Ladrillo	Resistencia mínima a la compresión MPa		Resistencia mínima a la flexión MPa	Absorción máxima de humedad %
	Promedio de 5 unidades	Individual	Promedio de 5 unidades	Promedio de 5 unidades
	macizo tipo A	25	20	4
macizo tipo B	16	14	3	18
macizo tipo C	8	6	2	25
hueco tipo D	6	5	4	16
hueco tipo E	4	4	3	18
hueco tipo F	3	3	2	25
Método de ensayo	INEN 294		INEN 295	INEN 296

Fuente: (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2002)

Estos valores se compararán con los resultados de esfuerzo máximo a compresión de los dos prototipos de tablero estructural tipo sándwich, presentados en la Sección 5.3.1.1. Los datos recopilados de todos los elementos a comparar se presentan en la Tabla 54.

Tabla 54

Resistencia a la compresión de elementos utilizados para la elaboración de muros

Elemento	Resistencia a la compresión MPa
Ladrillo macizo tipo A (NTE INEN 297)	20,00
Ladrillo macizo tipo B	14,00
Bloque Clase A (NTE INEN 3066)	12,40
Prototipo de tablero estructural tipo sándwich 1 (e=7,43 cm)	23,45
Prototipo de tablero estructural tipo sándwich 2 (e=15,76 cm)	19,46

En referencia a los datos expuestos en la Tabla 54, se puede verificar que la resistencia máxima a compresión del prototipo de tablero estructural tipo sándwich con 7.43 cm de espesor, fue 1.17 y 1.89 veces mayor que los valores presentados para ladrillo macizo tipo A y bloque clase A respectivamente. En cuanto al prototipo de tablero estructural tipo sándwich con 15.76 cm de espesor se puede apreciar que es 1.39 y 1.56 veces mayor que los valores presentados para ladrillo macizo tipo B y bloque clase A respectivamente.

Pese a que el prototipo 2 de tablero estructural tipo sándwich no supero el máximo valor de resistencia que presenta el ladrillo macizo tipo A, se puede decir que es más eficiente que los materiales convencionales ya que en Ecuador no se trabaja con mampostería de buena calidad, esto se puede comprobar en el estudio presentado por Mejía Quiñonez y Pachacama Velásquez (2018), en el cual se realizan pruebas de

compresión de bloques de distintas partes de la ciudad de Quito, Ecuador; teniendo resultados máximos que no superan los 6 MPa, lo cual los sitúa muy por debajo de la clase A.

6.6.4. Comparación con materiales convencionales por su costo energético de producción

Una ventaja innata de la madera sobre los materiales convencionales es que es un material renovable. Además, que dependiendo de la zona se puede cultivar en la misma; esto quiere decir que incluso se disminuye costos por transporte, el cual es uno de los valores más altos a pagar en el sector de la construcción (Janssen, 1981).

La energía de producción de materiales es un tema delicado y ambiguo debido a que cada autor identifica la energía necesaria para la producción de materiales, basándose en un juicio cuantitativo que depende del lugar y de las condiciones en las que se realice el estudio. Pese a que no existe un método exacto para el cálculo de la energía incorporada en cada material de construcción, sí existe una regla general aceptada; “la energía incorporada en los materiales de construcción incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material desde su origen hasta su destino final”, esto quiere decir desde la extracción de materias primas, hasta su manufactura e implementación (Espí, 2001).

Se tomó valores de energía necesaria para la producción de distintos materiales de ingeniería de la investigación de Janssen (1981) titulada “Bamboo in building structures”, presentados en la Tabla 55.

Tabla 55*Costo energético de producir distintos materiales de ingeniería*

Material	Costo energético	
	kWh/kg	MJ/kg
Áridos	0,02	0,08
Ladrillo de tierra compactada	0,14	0,51
Madera	0,28	1,00
Hormigón	0,36	1,31
Ladrillo silicocalcáreo	0,45	1,62
Hormigón ligero	0,50	1,80
Ladrillo cerámico	0,92	3,31
Aislantes térmicos plásticos	1,13	4,05
Mampostería en seco	1,40	5,04
Cal	1,50	5,40
Cemento	2,10	7,56
Plomo reciclado	2,78	10,01
Vidrio reciclado	3,50	12,60
Acero Reciclado	3,64	13,12
Teja cerámica plana	4,40	15,84
Vidrio celular	4,69	16,88
Papel	6,51	23,44
Porcelana	6,80	24,48
Asfalto	7,50	27,00
Vidrio	8,78	31,62
Aluminio reciclado	8,85	31,85
Acero inoxidable	9,03	32,51
Acero	9,75	35,09
Cobre reciclado	12,50	45,00
Zinc	15,00	54,00
Polipropilenos	20,00	72,00
PVC	20,70	74,52
Plástico	21,98	79,14
Cobre (chapa)	22,90	82,44
Resinas termoestables	24,00	86,40
Plomo	26,93	96,96
Plástico reciclado	29,00	104,40
Policarbonatos	30,00	108,00
Poliuretanos	33,30	119,88
Aluminio	56,50	203,40
Titanio	154,00	554,40

Fuente: (Janssen, 1981)

La Tabla 55 se ordenó ascendentemente según el costo energético de cada material de ingeniería, se aprecia que la madera se encuentra por encima de la mayoría de materiales usados en el campo de la construcción para una mayor comprensión de la magnitud de costo energético se presenta la Figura 89.

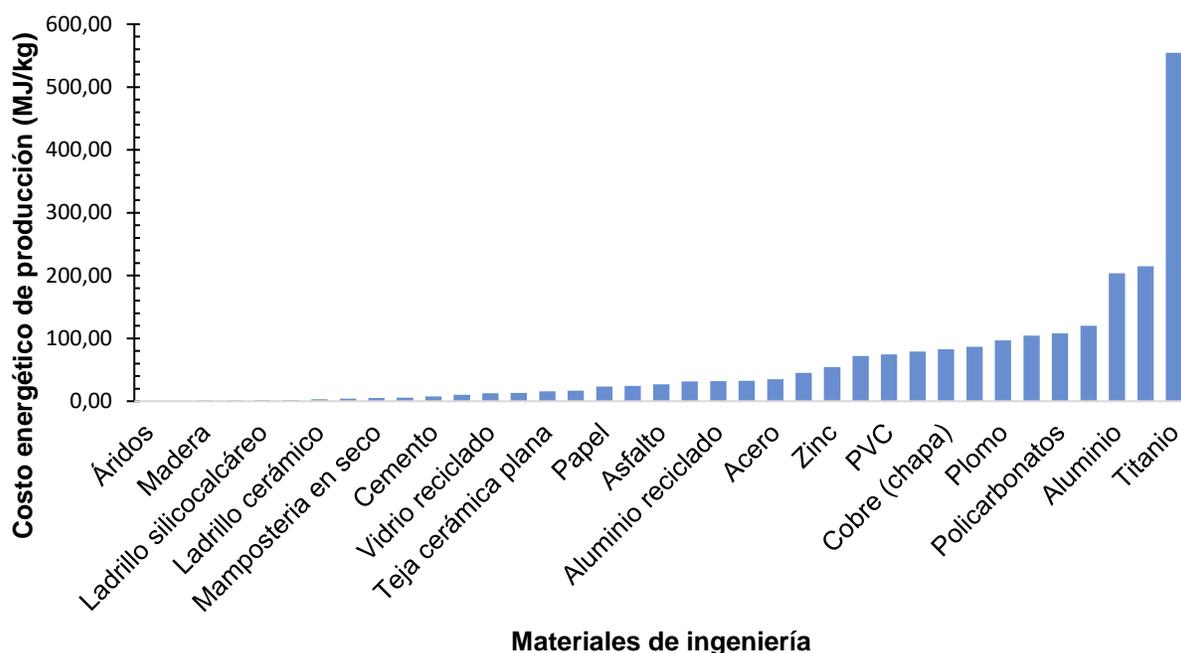


Figura 89 Costo energético de producir distintos materiales de ingeniería

Se identifica que el costo energético de la madera respecto a materiales por los cuales se puede reemplazar es 23.54% menor que el hormigón, 38.27% menor que el ladrillo silicocalcáreo, 44.44% menor que el hormigón ligero, 69.77% que el ladrillo cerámico, 86.77% menor que el cemento, 96.86% menor que el aluminio reciclado y 96.92% que el acero; este factor influye directamente en el costo y la cantidad de contaminación producida al elaborar un material.

Es por esto que se debe promover la construcción con madera, ya que, al gastar menos energía en su producción, su huella medio ambiental será menor pues repercutirá menos en el ambiente que utilizar materiales convencionales como concreto y acero.

CAPITULO VII

7. ESTUDIOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Estudios Futuros

7.1.1. Resistencia al fuego

Dentro de la construcción con madera o con materiales a base de madera es imperante aportar conocimiento acerca del comportamiento de estos materiales frente a la acción del fuego (Garay & Henriquez, 2010) .

El estudio de resistencia al fuego de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich tiene una importancia enorme al momento de fomentar su uso, esto se debe a que mucha gente sigue con la imagen de que la madera es un material con un pésimo comportamiento ante el fuego, y esto no es cierto.

La resistencia al fuego es medida en minutos y se describe como la capacidad que posee un elemento de construcción para mantener durante un determinado periodo de tiempo sus características estructurales mientras se encuentra afectado por ciertos límites de temperatura (Garay & Henriquez, 2010).

Es de conocimiento general que la madera es inflamable, pero se debe diferenciar el significado entre inflamable y resistencia al fuego. Si se somete una pieza de madera ante la acción del fuego, se genera en la capa externa una corteza carbonizada, la cual ralentiza el progreso del fuego mientras se van manteniendo las propiedades mecánicas de la pieza (véase Figura 90). Por otra parte, en el caso del acero al alcanzar temperatura

elevada ($> 400^{\circ}\text{C}$) ya empieza a perder sus propiedades mecánicas, incluso sin que se produzca combustión (LIZÁN NARRO, 2018).

La pieza de madera no falla por disminución de sus propiedades mecánicas, sino que su sección útil disminuye hasta tal punto que no puede soportar las cargas actuantes. Mientras que la pieza de acero falla debido a que se plastifica y ocasiona el colapso, es decir, que con el aumento de temperatura va perdiendo sus propiedades mecánicas paulatinamente (LIZÁN NARRO, 2018).



Figura 90 Vigas de madera parcialmente carbonizadas tras incendio. Por fuera aparentan estar totalmente quemadas, pero se conserva su sección.

Fuente: (LIZÁN NARRO, 2018)

Algunos estudios relacionados a incrementar la resistencia de las maderas ante el fuego, han presentado distintas soluciones tales como el uso de retardantes de llama, pinturas intumescentes que se impregnan en la madera incluso en ambientes de alta humedad y baja temperatura (Garay & Henriquez, 2010). Otras opciones un tanto tradicionales suelen ser el uso de productos minerales, como las placas de fibrocemento o las placas de yeso y cartón.

El campo de estudio de la resistencia al fuego para los tableros tipo sándwich es amplio y en consecuencia, amerita un estudio completo y detallado; el cual queda abierto a nuevos investigadores con el afán de cambiar el modo en que se trabaja actualmente

en Ecuador, los temas que se podrían abordar serían: (i) especie, densidad, escuadría y forma, (ii) tamaño de fuente calorífica, (iii) coeficiente de conductividad calorífica de la madera (iv) calor específico y (v) formación de carbón (velocidad de carbonización).

7.1.2. Aislamiento acústico

Dentro de los objetivos de la construcción con madera uno de los más importantes es el confort. Para poder hablar de confort acústico dentro de una edificación se debe aislar los espacios interiores, de ruidos producidos en el exterior y en espacios próximos (Fundación Laboral de la Construcción, 2014).

Una investigación adicional con respecto a las bondades de la madera y de su uso en prototipos de tablero estructural tipo sándwich es el aislamiento acústico. Este se basa en determinar la diferencia entre el nivel de intensidad acústica originaria y el nivel de intensidad acústica que se ha transmitido (Fundación Laboral de la Construcción, 2014).

Las ondas que chocan las paredes producen vibraciones, lo cual ocasiona que estas ondas se reproduzcan al otro lado de la misma (véase Figura 91). La transmisión del sonido en una pared depende de algunos factores como (i) peso, (ii) espesor y área (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

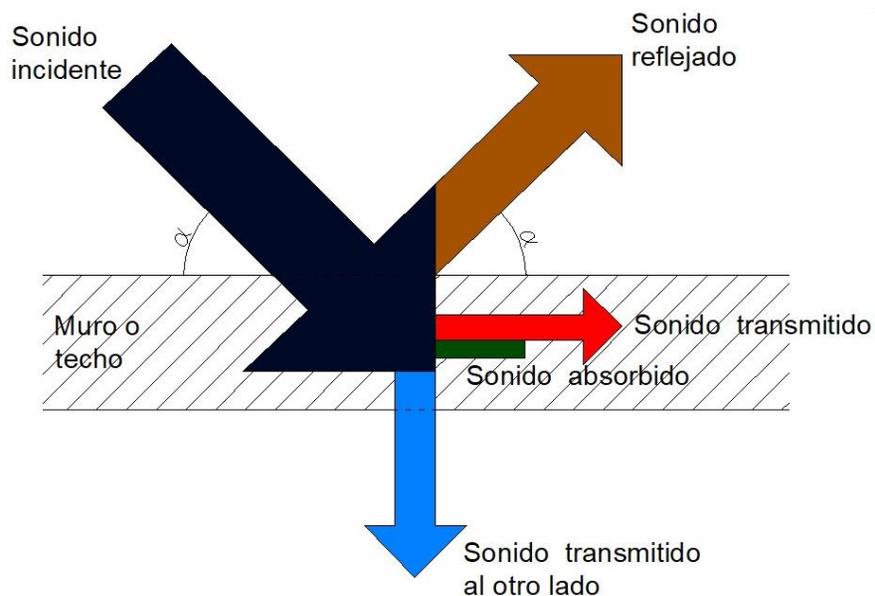


Figura 91 Transmisión de sonido en muros o techos
Fuente: (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984)

El aislamiento que ofrece un muro, pared o techo se mide en decibeles y se entiende como la diferencia entre los niveles sonoros del local en el que se encuentra el emisor y el local en el que está el receptor (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

Habitualmente se ha aceptado que los entramados de madera no son buenos aislantes del ruido en comparación de materiales convencionales como el hormigón, el bloque o el ladrillo. Esto se debe a que el aislamiento acústico se relaciona al concepto de masa, es decir, a mayor masa mayor aislamiento acústico; pero esto solo se aplica a materiales homogéneos, ya que al combinar distintos elementos en un solo compuesto se puede conseguir un buen nivel de aislamiento acústico (Sánchez, 1995).

El sonido y sus vibraciones viajan a través del aire y este a su vez puede golpear en dos tipos de superficies; (i) superficies lisas y duras que son reflexivas, y (ii) superficies blandas y porosas que son absorbentes (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

El prototipo de tablero estructural tipo sándwich es un material compuesto, elaborado de una superficie lisa de alta densidad que es reflexiva y un núcleo blando compresible que absorbe el sonido y lo transforma en calor, este compuesto en teoría sería un excelente elemento de aislamiento acústico en el sector de la construcción. Por lo tanto, es imperante el estudio de las propiedades acústicas del prototipo de tablero estructural tipo sándwich con el objetivo de aumentar las ventajas del mismo a la hora de compararse con materiales convencionales de la construcción como el acero y el concreto.

Entre los materiales que mejor funcionan como barreras de sonido están; (i) los tableros de yeso, los tableros contrachapados y madera cemento, el hormigón y el vidrio. Estas barreras de sonido reducen la energía cuando las vibraciones de sonido los atraviesan reflejando parte de ellas (Sánchez, 1995).

7.1.3. Protección ante agentes patógenos

La madera, al igual que todos los materiales, tiene limitaciones, una de las más importantes es su durabilidad natural la cual se define como la resistencia que opone este material ante la pudrición por hongos, el ataque de insectos o diversos agentes destructores. Un indicador de la durabilidad de la madera es la densidad seca, en consecuencia, las maderas más densas serán las más durables. Esta valoración tiene algunas excepciones por lo que es necesario determinar la durabilidad natural real de cada especie (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984).

Esta característica de las maderas se puede aumentar mediante procedimientos simples como el secado o por tratamientos preservadores más elaborados. Según la

Junta Del Acuerdo De Cartagena (1984), por lo general los preservantes pueden ser compuestos químicos en estado puro o combinaciones, los cuales varían dependiendo de su uso. Los principales y más utilizados se presentan en la Figura 92.

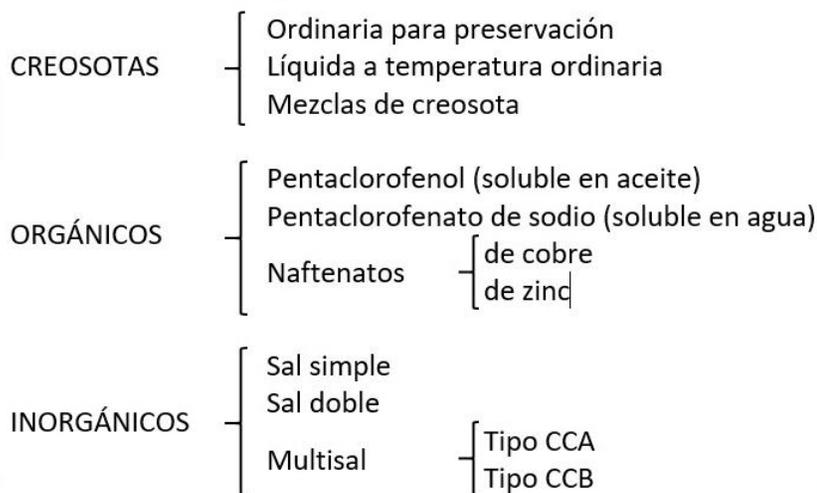


Figura 92 Preservantes de madera ante agentes patógenos
Fuente: (Junta Del Acuerdo De Cartagena, 1984)

Creosota: es un compuesto a base de alquitrán con cantidades notables de ácidos. Protege a la madera de la humedad en el ambiente.

Pentaclorofenol: Se forma de la reacción del cloro y el fenol, no es soluble en agua y es muy eficaz contra los hongos e insectos xilófagos.

Naftenatos: Compuestos gomosos o cerosos. Los más comunes son naftenatos de cobre y zinc. Tienen un alto poder fungicida.

Inorgánicos o Hidrosolubles: A este tipo de preservadores pertenecen la mayoría de sales comerciales en el planeta. Se utilizan generalmente sales simples como el arsénico y el cobre, aunque las mezclas de ácido bórico y tetraborato de sodio

funcionan correctamente. Comúnmente se utiliza esta clase de preservantes en maderas para interiores ya que al ser solubles en agua se pueden lavar en la lluvia. Para poder utilizarlas en el exterior se debe perder su solubilidad al penetrar en la madera mediante el método de impregnación profunda, el cual consiste en impregnar un líquido a la madera para hacerla más resistente a los cambios meteorológicos y ataques de insectos (LIZÁN NARRO, 2018).

Otro de los agentes destructores que ocasionan en la madera una fuerte degradación, es el intemperismo, el cual dependiendo de la energía a la que esté sometida la madera presenta diferentes niveles de degradación partiendo desde ligero hasta severo. Morales y Sordo (1995) presentan la Tabla 55 en donde indica el nivel de degradación de la madera dependiendo de la energía que se le aplica.

Tabla 56

Daños de la madera por aplicación de diversos tipos de energía

ENERGÍA	DEGRADACIÓN	NIVEL
Calor	Oscurecimiento	Ligero
Radiaciones U.V.	Cambio de color	Severo
	Degradación química	Severo
Mecánica	Desgaste	Ligero
	Erosión	Ligero
	Agrietamiento	Severo
	Separación de fibras	Severo
Química	Agrietamiento	Severo
	Separación de fibras	Severo
	Lixiviación	Severo
	Cambio de color	Severo
	Perdida de resistencia	Severo

Fuente: (Morales & Sordo, 1995)

Como se puede ver en la Tabla 56, la madera está expuesta a muchos factores que pueden disminuir sus características mecánicas e incluso dejar inservible al elemento. Este es un tema importante a desarrollar en los prototipos de tablero estructural tipo sándwich ya que se necesitaría determinar cuáles son los preservantes adecuados para ser utilizado tanto en exteriores como en interiores; sin que estos disminuyan sus características mecánicas estructurales.

7.1.4. Capacidad de absorción y disipación de energía de los tableros estructurales tipo sándwich.

Una investigación adicional con respecto al comportamiento elástico que tienen los prototipos de tablero estructural tipo sándwich ante esfuerzos dinámicos sería de importante relevancia, ya que se podría determinar cuál es el efecto que tienen las cargas cíclicas, como las de sismo, sobre los prototipos de tablero estructural tipo sándwich. Este estudio traería importante información acerca de qué tipo de fallas presenta el material compuesto y como es su evolución cuando esfuerzos dinámicos actúan sobre el mismo.

Además, brindaría conocimiento acerca de cuál es la capacidad de absorción y disipación de energía que tiene cada prototipo de tablero estructural tipo sándwich, es decir se podría elaborar una tabla que indique cuál es la variación de capacidad de absorción y disipación de energía cuando la composición de los prototipos varíe.

Las ventajas que podría tener un estudio de cargas cíclicas sobre los prototipos de tablero estructural tipo sándwich, son gigantescas, debido a que, al caracterizar los prototipos en este campo de estudio, se tendrá una fuerte base experimental al momento de utilizar los tableros estructurales tipo sándwich en edificios de más de dos pisos, donde

las fuerzas sísmicas se magnifican y la estructura empieza a trabajar como un péndulo invertido.

7.2. Conclusiones

Una vez terminada la investigación se concluye que:

- Los métodos de ensayo y normas aplicadas para realizar la caracterización mecánica de tableros estructurales tipo sándwich fueron correctamente escogidas, ya que en base a estas se desarrolló toda la investigación y se pudo comprobar que los resultados obtenidos fueron verídicos, además proporcionaron una base clara sobre los procedimientos y necesidades del material, al momento de determinar sus características mecánicas.
- Se comprobó que Ecuador tiene la capacidad productiva de promover un enfoque distinto en el sector de la construcción, impulsando la construcción sustentable en base a la producción de tableros estructurales tipo sándwich elaborados a base de bio materiales (balsa (*Ochroma pyramidale*) y melina (*Gmelina arborea*)), ya que de todas plantaciones madereras que tiene el país, la demanda nacional es solo del 10% y el 90% restante se destina a la exportación.
- Cada prueba realizada en laboratorio está destinada a encontrar una característica mecánica específica, por lo que no se puede obviar ninguna de estas al momento de caracterizar completamente el tablero estructural tipo sándwich.

- Pese al historial de eventos sísmicos que se han desarrollado a lo largo de la historia del país, no se están tomando medidas correctivas en el sector de la construcción, sobre todo en las zonas más afectadas. Esto se debe, por una parte, a la falta de control en la construcción informal, pues se siguen utilizando materiales inadecuados faltos de control de calidad y no se aplican los métodos constructivos correctos. Por otra parte, no se aprovechan los materiales circundantes de la zona, es decir que se prefiere un material de baja calidad proveniente de otra zona, que la sociedad lo ha catalogado como “seguro”, y no se desarrollan nuevas tecnologías a través de materiales, que aparte de tener excelentes características mecánicas, se encuentra en la zona, son materiales renovables y amigables con el medio ambiente.
- Los materiales utilizados para elaborar los tableros estructurales tipo sándwich cumplieron con las expectativas para lo que fueron creados, pues al combinarse en un material compuesto, cada uno brinda características específicas que mejoraron el comportamiento del tablero tipo sándwich, ya que el material denso en la parte exterior aporta rigidez y resistencia a esfuerzos, mientras que el núcleo blando de baja densidad, brinda flexibilidad al tablero y a su vez aumenta su inercia.
- El prototipo 1 de tablero estructural tipo sándwich cuyo espesor es de 7.74 cm tuvo mejores resultados en la caracterización mecánica que el prototipo 2 de 15.6 cm espesor, pese a esto, se determinó que el prototipo 1 y sus derivados estén destinados para divisiones interiores y no para soportar cargas, debido a

su rápida fractura al momento de llegar a su esfuerzo máximo. El prototipo 2 de tablero estructural tipo sándwich cuyo espesor es de 15.6 cm, demostró una alta capacidad de resistir cargas y se recomienda su uso como muro estructural externo, debido a su alta ductilidad y capacidad de deformarse sin llegar a la fractura del material.

- La modelación en elementos finitos dentro de una investigación cualitativa de materiales es de suma importancia, ya que mediante esta se puede compensar datos de laboratorio que no son 100 % fiables, debido a factores externos presentes el momento de ensayar el material. También se concluye que se debe escoger el método de modelación de elementos finitos en base a los requerimientos de la investigación, es decir, se debe estudiar distintas opciones de programas y determinar cuál es el óptimo para el estudio que se desea realizar. En esta investigación se desarrolló el análisis de elementos finitos en dos programas (LS-DYNA y SAP 2000), siendo el primero excelente para la modelación a detalle de un material compuesto con diferentes direcciones en sus elementos, además de poder simular cualquier condición de carga y el segundo muy eficiente al momento de encontrar esfuerzos y deformaciones sobre un material.
- Los dos prototipos de tablero estructural tipo sándwich elaborados en esta investigación poseen altos índices de rendimiento en cuanto a elasticidad y fuerza, ya que incluso superan índices de rendimiento de algunos materiales de ingeniería como el bambú, el polímero reforzado con fibra de carbono, aleaciones de aluminio y el acero.

- Los prototipos de tablero estructural tipo sándwich presentan algunas ventajas sobre los materiales convencionales con los que generalmente se trabaja al momento de realizar paredes, ya que el prototipo 1 y 2 en cuestión de peso son 8 y 4 veces menores respectivamente, en cuanto a resistencia se evidencia que los prototipos de tablero estructural tipo sándwich superan el esfuerzo solicitado por normativa ecuatoriana a los materiales convencionales como bloque clase A y ladrillo tipo A y B, presentados en la norma NTE INEN 3066 y NTE INEN 297.
- En cuanto al impacto ambiental generado por la producción de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich es entre 20 y 9 veces menos contaminante, con un costo energético de producción 35.09 y 1.31 veces menor que el de materiales convencionales como acero y concreto, respectivamente. Por esto, se concluye que los tableros estructurales tipo sándwich presentado en esta investigación es un material amigable con el medio ambiente, ya que es bio degradable y posterior a su ciclo de vida como material estructural, se le puede dar diferentes usos como fuente de energía, materia prima para tableros de partículas (OSB), elaborar papel o muebles reciclados de bajo costo.

7.3.Recomendaciones

Una vez desarrollado el tema de investigación se puede recomendar:

- Realizar los estudios futuros presentados en la Sección 7.1 para cerrar el ciclo de investigación.

- Una vez terminado el ciclo de investigación, promover el uso de tableros estructurales tipo sándwich para rehabilitar futuras viviendas en caso de ser afectadas por un evento catastrófico.
- Realizar campañas de promoción de la construcción en madera, con el fin de cambiar la imagen que tiene la sociedad de este material.
- Elaborar normativa ecuatoriana específica relacionada a materiales ingenieriles de madera, ya que, al momento de buscar parámetros para la caracterización de los tableros estructurales tipo sándwich, se tuvo que utilizar estándares internacionales.
- Implementar dentro de la Universidad programas destinados a la investigación de nuevos materiales estructurales en base a productos renovables y no redundar sobre investigaciones que no aportan al crecimiento de la sociedad.
- Adquirir equipos destinados a la investigación de biomateriales, para aumentar la precisión y facilitar la ejecución de ensayos.

7.4. Bibliografía

- Aguilar, J., & Guzowski, E. (2011). *Materiales y materias primas - madera*. C. y. T.-I. N. d. E. T. Ministeria de Educación.
- Alfías, H., & Jacobo, G. (2011). Eficiencia energética en viviendas sociales. Incidencia de la envolvente en el consumo eléctrico para mantener el bienestar higrotérmico en los espacios interiores. *ARQUISUR*, 1(1), 76-89, ISSN:2250-4206.
- Allen, H. G. (1969). *Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division*: Elsevier, ISBN:1483159043.
- Angel, J. (2017). Para que se usa la madera de balsa. In Á. d. balsa (Ed.),
- Ashby, M. F. (1994). Materials selection in mechanical design. *Metallurgia Italiana*, 86, 475-475, ISSN:0026-0843.
- Ashby, M. F., & Cebon, D. (1993). Materials selection in mechanical design. *Le Journal de Physique IV*, 3(C7), C7-1-C7-9, ISSN:1155-4339.
- Baeza, J. G. C., & Chuil, A. X. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS SANDWICH TIPO PANAL.
- Barreiro Elorza, P., & Ruiz-Altisent, M. (1996). Propiedades mecánicas y calidad de frutos. Definiciones y medidas instrumentales. *Fruticultura profesional*(77), 48-51, ISSN:1131-7965.
- Beall, C. (2000). *Masonry and Concrete*: McGraw Hill Professional, ISBN:978-0070067066.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J.-C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador

- (1587–1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613-1633, ISSN:1365-246X.
- Bonilla, M. (2016). 47 heridos y 3 fallecidos por sismos en el cantón Atacames
- Buchanan, A. H., & Honey, B. G. (1994). Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings*, 20(3), 205-217, ISSN:0378-7788.
- Buchanan, A. H., & Levine, S. B. (1999). Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, 2(6), 427-437, ISSN:1462-9011.
- Bueche, F. J., Hecht, E., Castellanos, J. H. P., & Luna, R. H. H. (1991). *Física general*: McGraw-Hill, ISBN:9684227957.
- Butterfield, B. G., & Meylan, B. A. (1997). *A fatest háromdimenziós szerkezete: three-dimensional structure of wood: Hungarian edition*, ISBN:9630488124.
- C.I. Campos, F. A. R. L. (2004). Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído. *Matéria*, 11,
- Cabo Laguna, M. (2011). *Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción*. (Ingeniero técnico agrícola en explotaciones agropecuarias Tesis de Ingeniería), Universidad Pública de Navarra, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Retrieved from [http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/4504](http://academica.e.unavarra.es/handle/2454/4504)
- Cañas, U. C. J. S. (2008). Propiedades mecánicas: curva Esfuerzo - Deformación Unitaria

- Carabaño Rodríguez, R., Galván Martínez, J., Oteiza, I., & Martínez Sierra, E. (2014). *Madera contralaminada (CLT), situación actual. Alternativa para una construcción sostenible en España*. Paper presented at the I Congreso Internacional sobre Investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónica, Madrid, ISBN:32534.
- Castro, G. (2006). Usos actuales y posibilidades futuras de la madera de álamo. *Actas Jornadas de Salicáceas*,
- Castro, I., & Alejandro, I. (2012). Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía.
- Chudnoff, M. (2007). *Tropical timbers of the world*: Verlag Kessel, ISBN:3935638825.
- CIRAD , C. d. c. i. e. i. a. p. e. d. (2012). Balsa datasheet. Retrieved from <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/America/BALSA.pdf>
- Cruz de León, J. (2011). Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. *Comisión Nacional Forestal. México*,
- Cuevas, H. (1988). Un criterio de selección y consideraciones de uso de la madera en construcción. *Bosque*, 9(2), 71-76,
- Da Silva, A., & Kyriakides, S. (2007). Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*, 44(25-26), 8685-8717, ISSN:0020-7683.
- Dawkins, C. (1919). Yemane (*Gmelina arborea*) in Upper Burma. *Indian Forester*, 45(10), 506-519, ISSN:2321-094X.
- Dias, F. (2017). Fabricación y caracterización de tablero compensado con adhesivo poliuretano a base de aceite de ricino. *Revista de Ciencia y Tecnología(7b)*, 42-48, ISSN:1851-7587.

Dinwoodie, J. (1975). Timber—a review of the structure-mechanical property relationship.

Journal of Microscopy, 104(1), 3-32, ISSN:0022-2720.

Dora, D. I., & Monteoliva, S. (2009). Densidad básica de la madera de Acacia melanoxydon R. Br en relación con la altura de muestreo, el árbol y el sitio.

Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 18(1), 101-110,

Doyle, D., McBurney, R., & Drow, J. T. (1962). Elastic properties of wood: the Young's moduli, moduli of rigidity, and Poisson's ratios of balsa and quipo.

Durán, A. (2004). *La construcción de viviendas en madera* (C. 2004 Ed.), ISBN:9568398007 9789568398002.

Dvorak, W. (2004). World view of Gmelina arborea: opportunities and challenges. *New Forests*, 28(2-3), 111-126, ISSN:0169-4286.

El Comercio. (2016). Ecuador: El secreto de las casas que resistieron el terremoto

Enriquez, P., & Stalin, L. (2007). *Formulación de recubrimientos a partir de partículas incorporadas a un polímero termoestable*. QUITO/EPN/2007.

Espí, M. V. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29-43, ISSN:1988-3234.

Fernandes, E. (2011). *Regularización de asentamientos informales en América Latina* (M.-. Cambridge, USA Ed.), ISBN:978-1-55844-202-3

Fletcher, M. I. (1951). Balsa—production and utilization. *Economic Botany*, 5(2), 107-125, ISSN:0013-0001.

Francis, J. (1991). *Ochroma pyramidale Cav. Balsa—Bombacaceae*. SO. Institute of Tropical Forestry, USDA, SM-41. Río Piedras. PR. 6p,

- Fundación Laboral de la Construcción. (2014). Tecnología de la construcción; Técnicas de aislamiento e impermeabilización. (Vol. 1, pp. 20). Madrid: Tornapunta Ediciones978-84-15205-99-9
- Garay, R., & Henriquez, M. (2010). Comportamiento frente al fuego de tableros y madera de pino radiata con y sin pintura retardante de llama. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 12(1), 11-24, ISSN:0718-221X.
- Geological man. (2016). Riesgos Geológicos
- Gibson, L. J. (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the Royal Society Interface*, 18, ISSN:1742-5689. doi:10.1098/rsif.2012.0341.
- Gilbert, B. P., Underhill, I. D., Bailleres, H., & McGavin, R. L. (2014). Structural Veneer Based Composite products from hardwood thinning—Part II: Testing of hollow utility poles *Materials and Joints in Timber Structures* (pp. 629-640): Springer,
- Gilbert, B. P., Underhill, I. D., Fernando, D., & Bailleres, H. (2017). Structural solutions to produce long timber Veneer Based Composite hollow sections. *Construction and Building Materials*, 139, 81-92, ISSN:0950-0618.
- Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 4. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 4.1-4.19., 190, 4.1-4.19,*
- González, G., & Moya, R. (2003). Ensayos tecnológicos de vigas laminadas de melina. *Seminario: La Industria y la comercialización de productos forestales en Latinoamérica. INISIFOR–UNA*, 1(2002), 101-108,

- González M, O. M. (2018). *The ingenious tree of life* (Vol. 1). Lambert academic publishing, ISBN:106466573.
- Gonzalez Mosquera, M., Gilbert, B., Bailleres, H., & Guan, H. (2014). Compressive strength and stiffness of senile coconut palms stem green tissue.
- González Mosquera, O. M. (2015). *An engineering approach to understand senile coconut palms as foundation for biomimetic applications*. (Doctor of Philosophy Thesis PhD Doctorate), Griffith School of Engineering, Griffith School of Engineering. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10072/367602>
- Gonzalez, O. M., & Nguyen, K. A. (2015). Mechanical efficiency and bending capacity of senile coconut palm stems: a 3D finite element approach.
- Gregg, J. S., Andres, R. J., & Marland, G. (2008). China: Emissions pattern of the world leader in CO2 emissions from fossil fuel consumption and cement production. *Geophysical Research Letters*, 35(8), ISSN:1944-8007. doi:10.1029/2007GL032887.
- Grenestedt, J. L., & Bekisli, B. (2003). Analyses and preliminary tests of a balsa sandwich core with improved shear properties. *International journal of mechanical sciences*, 45(8), 1327-1346, ISSN:0020-7403.
- Guss, L. M. (1995). Engineered wood products: the future is bright. *Forest Products Journal*, 45(7, 8), 17, ISSN:0015-7473.
- Header, G. (2016). Glue laminated timber: Google PatentsUS14797869
- Hernández, J. R. (2002). *Resistencia de materiales 2-A*: Pontificia Universidad Católica del Perú,

- Hinga, B. D. R. (2015). *Ring of Fire: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes*: ABC-CLIO, ISBN:1610692977.
- Huang, H., Liu, Z., Zhang, L., & Sutherland, J. W. (2009). Materials selection for environmentally conscious design via a proposed life cycle environmental performance index. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11-12), 1073-1082, ISSN:0268-3768.
- Jacobo, G. J. (2004). Tecnología de la construcción: nuevas perspectivas con la madera *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Secretaría de Investigación y Posgrado - Facultad de Urbanismo y Arquitectura: Universidad Nacional del Nordeste
- Janssen, J. J. (1981). Bamboo in building structures.
- Junta Del Acuerdo De Cartagena. (1984). *Manual de diseño para maderas del grupo Andino*: Junta del Acuerdo de Cartagena,
- Karlinasari, L., Wahyuna, M., & Nugroho, N. (2008). Non-destructive ultrasonic testing method for determining bending strength properties of Gmelina wood (*Gmelina arborea*). *Journal of Tropical Forest Science*, 99-104, ISSN:0128-1283.
- Kenny, C. (2009). Why do people die in earthquakes? The costs, benefits and institutions of disaster risk reduction in developing countries.
- Laboratory, F. P., & Agriculture, U. s. D. o. (2007). *The Encyclopedia of Wood*: Skyhorse Publishing Inc., ISBN:1602390576.
- Lamb, A. (1968). Fast growing timber trees of the lowland tropics, No. 2 *Cedrela odorata*. *Fast growing timber trees of the lowland tropics, No. 2 Cedrela odorata.*,

- Larrua Quevedo, R., & Pignatta Silva, V. (2013). Modelación térmica del ensayo de conexiones acero-hormigón a elevadas temperaturas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(3), 210-218, ISSN:0254-0770.
- Lee, Y. (1964). Timber tests-Yemane (Gmelina arborea (Roxb.)). *Malayan Forester*, 27(4), 370-374,
- Lizán Narro, P. (2018). *Construir en madera*.
- Lloret, A. (2011). *Energy performance contracting model for new building projects in Ecuador*. (Master of Engineering Major Sustainable Energy Tesis de master), Melbourne: RMIT University. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/111>
- Loayza Añasco, M. E. (2017). *Proyecto de factibilidad para la creación de una productora y exportadora de bloques de balsa encolados hacia el mercado de China*. (Maestría en Finanzas y economía empresarial Tesis de Master), Universidad Católica de Guayaquil. Retrieved from <http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/861/1/tesina%20newton%20cuadros%20mendoza%20balsa.pdf>
- MAE, M. d. A. (2014). *Propiedades anatómicas, físicas y mecánicas de 93 especies forestales*. I. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
- Manriquez, G. R. L. (2002). Correlación entre métodos analíticos y numéricos para el cálculo de vigas y paneles de estructuras tipo Sandwich.

- Manzo, S. V., & Hernández, J. V. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81-87, ISSN:2448-7597.
- Martínez, S. E. (2012). *Durabilidad, bajo condiciones climáticas, del Panel Compuesto Ligero Autoportante, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, que se emplea como sistema de cerramiento de cubiertas*. Universidad de Oviedo.
- Mejía Quiñonez, J. A., & Pachacama Velásquez, N. G. (2018). *Diseño de bloques para mampostería en obras civiles con agregados de fibras de caucho de neumático y plástico reciclado (PET)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Civil.
- Méndez-Mejías, L. D. (2016). Determinación del módulo de elasticidad por los métodos dinámico y estático para madera termo-tratada de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(30), 43-50, ISSN:2215-2504.
- Mendoza Cuadros, N. D. (2013). *PRODUCCIÓN Y EXPORTACIÓN DE MADERA DE BALSA*.
- Meza, J., Franco, E., Farias, M., Buiochi, F., Souza, R., & Cruz, J. (2008). Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando la técnica de indentación instrumentada y de ultrasonido. *Revista de metalurgia*, 44(1), 52-65, ISSN:0034-8570.
- Midgley, S., Blyth, M., Howcroft, N., Midgley, D., & Brown, A. (2010). Balsa: biology, production and economics in Papua New Guinea. *ACIAR Technical Reports Series*(73),
- Ministerio de Salud de Argentina. (2015). *Terremotos*. S. e. e. y. desastres.

- Miravete, A., & Castejón, L. (2002). Materiales compuestos. *Temas de disseny*(20), 123-139, ISSN:2385-7951.
- Moncayo Galárraga, G. A. (2017). *Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (Ochroma Pyramidale) ecuatoriana*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica., Departamento de Energía y Mecánica. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13244>
- Morales, M. I. C., & Sordo, J. J. E. (1995). Acabados para madera en exteriores. *Madera y Bosques*, 1(2), 9-22, ISSN:2448-7597.
- Morán Plaza, M. F., & Nieto Alava, L. N. (2015). *Plan de exportación de madera semi dura melina al mercado de Birmania*.
- Neuvonen, E., Salminen, M., Heiskanen, J., Hochstrate, M., & Weber, M. (1998). Laminated veneer lumber: Overview of the forest product, manufacturing, and marketing situation. Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu. Department of Forest Products Marketing, Wood Based Panels Technology. [http Wood-Based Panels Technology](http://Wood-Based Panels Technology). Department of Forest Products Marketing
- Newaz, G., Mayeed, M., & Rasul, A. (2016). Characterization of balsa wood mechanical properties required for continuum damage mechanics analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(1), 206-218, ISSN:1464-4207.
- Niklas, K. J. (1992). *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago press, ISBN:0226586316.
- Obregón, C. (2005). *La Balsa una especie con futuro*: M&M

- Ong, C. (2015). Glue-laminated timber (Glulam). In L. Librarian (Ed.), *Wood Composites* (pp. 123-140): Elsevier, ISBN:1782424547, 978-1-78242-454-3, 978-1-78242-477-2, 1782424776.
- Osorio, B. G., Molina, X. C., Navarrete, E. T., Fonseca, C. S., & Ochoa, L. S. (2010). Caracterización del cultivo de balsa (*Ochroma Pyramidale*) en la Provincia de los Ríos-Ecuador. *Revista Ciencia y Tecnología*, 3(2), 7-11, ISSN:1390-4043.
- Otero, J. M. M. (2012). *Caracterización de paneles Sandwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio*. (Maestría en Ingeniería Mecánica y Materiales Tesis de Master), Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/18052>
- Palermo, Pampanin, Buchanan, & Newcombe. (2005). *Seismic design of multi-storey buildings using laminated veneer lumber (LVL)*. Paper presented at the New Zealand Society for Earthquake Engineering 2015 (NZSEE 2005), New Zealand, ISBN:978-0-0473-26634-9.
- Parra, P. (2015). La balsa, la apuesta del sector maderero. *ene*,
- Pearson, R. S., & Brown, H. P. (1932). Commercial timbers of India. *Their distribution, supplies, anatomical structure, physical and mechanical properties and uses*, 2,
- PLANTABAL®. (2016). BALTEK (Select Grade Structural Blasa).
- Popov, E. P., Nagarajan, S., & Lu, Z. (1982). *Mecánica de materiales*. Retrieved from
- Quilumba, C., Darío, C., Chiluisa, S., & Javier, M. (2017). *Automatización de la máquina inyectora de poliuretano de alta presión elastogran GMBH*. LATACUNGA/UTC/2017.

- Ramirez, A. P., Gómez, J. A. A., Armendariz, I. P., Flores, L. A. Q., & Candia, A. T. (2014).
Desarrollo de paneles tipo sandwich.
- Riddle, T. (2015). Hardwood or softwood? *Building Connection*(Spring 2015), 58-60,
ISSN:1320-0100.
- Rivera, C. S. (2017, 17 al 19 de Mayo 2017). *Revalorización de bloques de vivienda social en Chile por medio de paneles de madera upgrading social housing buildings in Chile through timber panels*. Paper presented at the II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, Buenos Aires, doi:T7-24
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190,*
- Salazar Valverde, J. J. (2018). *Análisis de la cadena de suministros y comercialización de madera balsa (Ochroma pyramidale) de la empresa Balplant al mercado chino*. Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Administrativas.
- Sánchez, J. E. P. (1995). *Casas de madera: los sistemas constructivos a base de madera aplicados a las viviendas unifamiliares*: AITIM, ISBN:8487381081.
- Seco, J. F.-G. (2003). *Manual de clasificación de madera*: AITIM, ISBN:848738126X.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Informe de Situación*. S. d. G. d. Riesgos.
- SENPLADES. (2016). *Evaluación de los costos de reconstrucción: Sismo en Ecuador - abril 2016*. S. N. d. P. y. Desarrollo.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2002). NTE INEN 297 Ladrillos cerámicos:
Requisitos

- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2014). NTE INEN 3066 Bloques de hormigón: Requisitos y métodos de ensayo
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875, ISSN:1364-0321.
- Soden, P., & McLeish, R. (1976). Variables affecting the strength of balsa wood. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 11(4), 225-234, ISSN:0309-3247.
- Spavento, E., María, E., Keil, F. M. S., & Darío, G. (2008). Propiedades mecánicas de la madera. *Curso de Xilotecología. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata*,
- Speck, T., & Burgert, I. (2011). Plant stems: functional design and mechanics. *Annual Review of Materials Research*, 41, 169-193, ISSN:1531-7331.
- Stauder, C. (2013). *Cross-Laminated Timber "An analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America"*. University of applied sciences: fachhochschule salzburg, Austrian Marshall Plan Foundation September. Retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/559921a3e4b02c1d7480f8f4/t/585c32fa6a4963601460c3f0/1482437399758/Stauder.pdf>
- Suntaxi Llumiquinga, C. A. (2014). *Diseño y construcción de un sistema de dirección para un vehículo trimoto*. LATACUNGA/ESPE/2014.

- Tamarit-Urias, J., & Fuentes-Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 9(2), 155-164, ISSN:2007-3828.
- Terradillos López, A. (2018). Diseño y fabricación de una barra flexible para un dispositivo de rehabilitación de torso.
- Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*: John Wiley & Sons, ISBN:0470844698.
- Thomas, A. (1939). The timber of Yemane [Gmelina arborea] grown in Malaya. *Malayan Forester*, 8, 84-85,
- Toosi, B. (2011). Cross Laminated Timber: The Market Opportunities in North America Canada: *FP Innovations*, May 12th
- Underhill, I. D., Gilbert, B. P., Bailleres, H., McGavin, R. L., & Patterson, D. (2014). Structural Veneer Based Composite products from hardwood thinning—Part I: Background and manufacturing. In R. Bookseries (Ed.), *Materials and joints in timber structures* (Vol. 9, pp. 577-588): Springer, doi:10.1007. ISBN:978-94-007-7810-8, 978-94-007-7811-5.
- Valdés, B. S. G., Guerra, M., Mieres, G., Alba, L., Brown, A., Rangel-Vázquez, N. A., . . . de la Hoz, Y. (2008). Caracterización estructural de poliuretanos mediante espectroscopia ftir y rmn (h y c 13). *Revista iberoamericana de polímeros*, 9(4), 377-388, ISSN:0121-6651.
- Vallejos Calzada, S. (2010). Estudio de la reducción de emisión de formaldehído en las resinas de urea formaldehído.

- Van De Kuilen, J., Ceccotti, A., Xia, Z., & He, M. (2011). Very tall wooden buildings with cross laminated timber. *Procedia Engineering*, 14, 1621-1628, ISSN:1877-7058. doi:10.1016.
- Vinueza, M. (2012a). *Ficha técnica N° 3 Melina*. G. Ministerio de Agricultura, Acuicultura y Pesca de Ecuador,. Ecuador Forestal
- Vinueza, M. (2012b). *Ficha técnica N° 7 Balsa*. G. Ministerio de Agricultura, Acuicultura y Pesca de Ecuador,. Ecuador Forestal
- Vizuite, V. (2011). *La informalidad en la construcción es el mayor riesgo en un terremoto*. I. G.-e. P. Nacional.
- Vozzo, J. (2010). *Manual de semillas de árboles tropicales*. Departamento de Agricultura de Estados Unidos.
- Wegst, U., & Ashby, M. (2004). The mechanical efficiency of natural materials. *Philosophical Magazine*, 84(21), 2167-2186, ISSN:1478-6435.
- Yépez, F., & Yépez, O. (2017). Role of construction materials in the collapse of R/C buildings after Mw 7.8 Pedernales–Ecuador earthquake, April 2016. *Case Studies in Structural Engineering*, 7, 24-31, ISSN:2214-3998.
- Zanuncio, A. J. V., Mendes, R. F., Mendes, L. M., Pires, M. R., & Carvalho, A. G. (2015). Desempenho de painéis OSB com adesivos comerciais e tânico debarbatimão. *Árvore no 6, vol.39*, ISSN:1806-9088.