



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
INGENIERA CIVIL**

**TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH
CONSTITUIDOS POR UN NÚCLEO DE BALSA Y PANELES
EXTERNOS DE BAMBÚ COMO ALTERNATIVA DE
MAMPOSTERÍA NO CONVENCIONAL PARA CONSTRUCCIONES
ECOLÓGICAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL
ECUADOR**

AUTOR: ANDINO BUSTAMANTE, NATHALY SARAY

**DIRECTOR: 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 COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CONSTITUIDOS POR UN NÚCLEO DE Balsa Y PANELES EXTERNOS DE BAMBÚ COMO ALTERNATIVA DE MAMPOSTERÍA NO CONVENCIONAL PARA CONSTRUCCIONES ECOLÓGICAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR*" fue realizado por la señorita *Andino Bustamante, Nathaly Saray*, 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, 16 de abril de 2019

Firma:

Tern. 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

Yo, *Andino Bustamante, Nathaly Saray*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CONSTITUIDOS POR UN NÚCLEO DE BALSA Y PANELES EXTERNOS DE BAMBÚ COMO ALTERNATIVA DE MAMPOSTERÍA NO CONVENCIONAL PARA CONSTRUCCIONES ECOLÓGICAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR*** es de mi 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, 16 de abril de 2019

Firma:

Srta. Andino Bustamante Nathaly Saray

C. C 1725641508



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, *Andino Bustamante, Nathaly Saray*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **TABLEROS ESTRUCTURALES COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH CONSTITUIDOS POR UN NÚCLEO DE Balsa Y PANELES EXTERNOS DE BAMBÚ COMO ALTERNATIVA DE MAMPOSTERÍA NO CONVENCIONAL PARA CONSTRUCCIONES ECOLÓGICAS EN REGIONES DE ALTO RIESGO SÍSMICO DEL ECUADOR** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 16 de abril de 2019

Firma:

Srta. Andino Bustamante Nathaly Saray

C. C 1725641508

DEDICATORIA

A Dios

Por ser mi guía durante el caminar de la vida, benciéndome y dándome salud y fuerzas suficientes para llegar a este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis familiares

A mi madre María por apoyarme incondicionalmente en cada etapa de mi vida y demostrarme con su ejemplo que los sueños se vuelven realidad con mucho esfuerzo y dedicación. A mis hermanos Josué e Ismael por sus palabras de aliento y compañía en buenos y malos momentos.

A mis amigos

Por creer en mí y siempre apoyarnos mutuamente en el cumplimiento de nuestras metas: Sofía Salto, Lenin Guarquila, Liliana Aldaz, Roberto Ramírez, Vanessa Rivilla, Jaime Quinapallo, Kevin Solís, Andrés García, Hua Lun Barrigas, Luis Méndez y Alejandro Sandoval.

Todos en conjunto me hicieron ver, que sin importar cuanto tiempo me tome, todo se puede si de verdad se quiere.

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes.

A mi familia por su fe, generosidad e incansable ayuda en todo momento, gracias a ellos he llegado a culminar un peldaño más de mi vida.

Al Tcn. Oswaldo Mauricio González, Ph. D por permitirme desarrollar el presente tema de investigación, por su paciencia, tiempo y conocimiento invertido, cuyos frutos se ven reflejados en la culminación de esta tesis.

Al Ing. Francisco Navas por su apoyo y conocimiento para realizar ensayos de laboratorio, su ayuda fue esencial para el avance de la investigación.

A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por bríndame una educación de excelencia y a los profesores que marcaron mi vida con su enseñanza y experiencia: Ing. Jorge Zúñiga e Ing. Estuardo Peñaherrera.

Al Ing. Marcelino Guachambala y la empresa 3A Composites, por creer en el presente proyecto desde el principio y brindarme su colaboración.

Al Ing. Jorge Macías y la empresa CENBA por su colaboración en cuanto a los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación.

A mis amigos Andrés García y Hua Lun Barrigas por todo el apoyo que me han brindado durante el desarrollo de mi tesis y todas las vivencias que tuvimos durante el desarrollo de la misma.

Finalmente quiero agradecer a todas mis amigos y amigas por su apoyo emocional cuando más las necesité, por extender su mano en momentos difíciles.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xx
ABSTRACT	xxi

CAPÍTULO I**GENERALIDADES**

1.1.Planteamiento del problema	1
1.1.1. Macro	2
1.1.2. Meso.....	4
1.1.3. Micro.....	5
1.2.Antecedentes	7
1.3.Área de influencia	10
1.4.Justificación e Importancia.....	10
1.5.Objetivos	11
1.5.1. Objetivo General.....	11
1.5.2. Objetivos Específicos	12

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes investigativos	13
2.2. Fundamentación teórica	15
2.2.1. Biomateriales	16
2.2.2. Engineered Wood Products	16
2.2.3. Cross laminated timber	17
2.2.4. Tableros estructurales tipo sándwich	18
2.2.5. Hardwoods, Softwoods y Palmwoods	20
2.2.6. Bambú Gigante (<i>Dendrocalamus asper</i>)	20
2.2.7. Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>)	24
2.3. Hipótesis	26
2.4. Variables de la investigación	26
2.4.1. Variables independientes	26
2.4.2. Variables dependientes	26
2.5. Cuadro de operacionalización de variables	26
2.6. Normativa relacionada	27
2.7. Metodología de desarrollo del proyecto	29

CAPÍTULO III

ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS

3.1. Estudio de factibilidad de la balsa y bambú para elaboración de panel de núcleo y paneles externos bidireccionales	31
3.1.1. Bambú (<i>Dendrocalamus asper</i>)	32
3.1.1.1. Fase de Pre-construcción	32
3.1.1.2. Fase de Construcción	34

3.1.1.3. Fase de Post-construcción	35
3.1.2. Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>).....	36
3.1.2.1. Fase de Pre-construcción	36
3.1.2.2. Fase de Construcción	37
3.1.2.3. Fase de Post-construcción.....	37
3.2. Estudio de factibilidad de ligantes	38
3.3. Adquisición de materiales	39
3.3.1. Bambú (<i>Dendrocalamus asper</i>).....	39
3.3.1.1. Selección	40
3.3.1.2. Corte.....	40
3.3.1.3. Transporte	41
3.3.2. Balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>).....	41
3.3.2.1. Selección	42
3.3.2.2. Corte.....	42
3.3.2.3. Transporte	42
3.4. Elaboración de paneles externos bidireccionales de bambú	42
3.5. Elaboración de núcleo de balsa	49
3.6. Ensamblaje de tableros estructurales tipo sándwich	53

CAPÍTULO IV

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS TABLEROS ESTRUCTURALES

TIPO SÁNDWICH

4.1. Introducción	55
4.2. Materiales y métodos	56
4.2.1. Densidad seca y contenido de humedad	56

4.2.1.1. Paneles de bambú y balsa.....	57
4.2.1.2. Tableros tipo sándwich	61
4.2.1.3. Configuración del ensayo.....	62
4.2.2. Compresión	63
4.2.2.1. Selección del material	64
4.2.2.2. Preparación del material.....	65
4.2.2.3. Configuración del ensayo.....	65
4.2.2.4. Cálculos.....	66
4.2.3. Tracción	67
4.2.3.1. Selección del material	68
4.2.3.2. Preparación de muestras.....	69
4.2.3.3. Configuración del ensayo.....	69
4.2.3.4. Cálculos.....	70
4.2.4. Flexión	71
4.2.4.1. Selección del material	72
4.2.4.2. Preparación del material.....	73
4.2.4.3. Configuración del ensayo.....	73
4.2.4.4. Cálculos.....	74
4.2.5. Corte.....	75
4.2.5.1. Selección del material	76
4.2.5.2. Preparación del material.....	77
4.2.5.3. Configuración del ensayo.....	77
4.2.5.4. Cálculos.....	78
4.3. Resultados	79

4.3.1. Resultados de Densidad y contenido de humedad.....	79
4.3.2. Paneles de bambú y balsa.....	79
4.3.3. Tableros estructurales tipo sándwich	82
4.3.2. Resultados de Compresión.....	83
4.3.3. Resultados de Tracción	87
4.3.4. Resultados de Flexión.....	91
4.3.5. Resultados de Corte	96
4.4. Discusión.....	100

CAPÍTULO V

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SANDWICH

5.1. Introducción	103
5.2. Materiales y métodos	104
5.2.1. Modelamiento de elementos finitos.....	104
5.2.1.1. Detalles del modelo.....	104
5.2.1.2. Propiedades geométricas y condiciones de borde.....	105
5.2.1.3. Propiedades físicas y mecánicas	107
5.2.1.4. Técnica de modelamiento de elementos finitos	108
5.2.1.5. Condiciones de carga	108
5.2.1.6. Método seleccionado para medición de la progresión de esfuerzos	109
5.2.1.7. Modelo óptimo de convergencia.....	109
5.2.2. Análisis de elementos finitos	118
5.2.2.1. Biomecánica del tablero estructural tipo sándwich.....	119
5.2.3. Eficiencia mecánica de los tableros estructurales tipo sándwich	120

5.3.Resultados	124
5.3.1. Biomecánica de los tableros estructurales tipo sándwich bajo esfuerzos de compresión .	124
5.3.1.1. Factores de compensación	125
5.3.2. Biomecánica de los tableros estructurales tipo sándwich bajo esfuerzos de flexión.....	126
5.3.2.1. Factores de compensación	128
5.3.3. Eficiencia mecánica	129
5.3.3.1. En términos de densidad y rigidez del material	129
5.3.3.2. En términos de densidad y resistencia del material	131

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TABLEROS PROPUESTOS Y COMPARACIÓN CON MATERIALES CONVENCIONALES

6.1.Carga axial admisible	134
6.1.1. Carga crítica por pandeo	134
6.2. Carga lateral admisible	137
6.3. Proyección de cargas admisibles para diferentes dimensiones de tableros estructurales tipo sándwich.....	140
6.3.1. Cálculo de la carga axial admisible	141
6.3.2. Cálculo de la carga lateral admisible	142
6.3.3. Resumen de propiedades de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de diferentes espesores	142
6.4. Costo referencial	146
6.5. Comparación con materiales convencionales	146
6.6.1. Peso	147
6.6.2. Resistencia	149
6.6.3. Impacto ambiental.....	150

6.6.4. Costo	152
--------------------	-----

CAPÍTULO VII

ESTUDIOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Potenciales aplicaciones	156
-------------------------------------	-----

7.2. Estudios futuros	157
-----------------------------	-----

7.2.1. Resistencia térmica	157
----------------------------------	-----

7.2.2. Resistencia acústica	158
-----------------------------------	-----

7.2.3. Resistencia contra agentes biológicos y abióticos	159
--	-----

7.2.4. Comportamiento ante esfuerzos dinámicos y capacidad de absorción de energía	159
--	-----

7.3. Conclusiones	160
-------------------------	-----

7.4. Recomendaciones	161
----------------------------	-----

7.5. Referencias bibliográficas	162
---------------------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Comparación de escala Richter y Mercalli modificada</i>	8
Tabla 2 <i>Propiedades mecánicas del bambú Dendrocalamus asper</i>	22
Tabla 3 <i>Propiedades mecánicas del BALTEK® SB 100</i>	25
Tabla 4 <i>Cuadro de operacionalización de variables</i>	26
Tabla 5 <i>Matriz de diseño de la investigación a desarrollar en el presente estudio</i>	30
Tabla 6 <i>Muestras seleccionadas para prueba de densidad y contenido de humedad en paneles</i>	58
Tabla 7 <i>Muestras seleccionadas para prueba de densidad</i>	58
Tabla 8 <i>Muestras seleccionadas para prueba de densidad y contenido de humedad</i>	62
Tabla 9 <i>Muestras seleccionadas para prueba de compresión</i>	64
Tabla 10 <i>Muestras seleccionadas para prueba de tracción</i>	69
Tabla 11 <i>Muestras seleccionadas para prueba de flexión</i>	72
Tabla 12 <i>Muestras seleccionadas para prueba de tracción</i>	76
Tabla 13 <i>Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de balsa $e=89$ mm</i>	80
Tabla 14 <i>Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de balsa $e=44$ mm</i>	80
Tabla 15 <i>Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de paneles externos</i>	81
Tabla 16 <i>Densidad al contenido de humedad y seca de paneles tipo sándwich</i>	82
Tabla 17 <i>Módulo de elasticidad promedio y módulo de ruptura de compresión de prototipos</i> ..	83
Tabla 18 <i>Módulo de ruptura de tracción promedio de prototipos</i>	88
Tabla 19 <i>Módulo de ruptura de corte y esfuerzo de flexión promedio</i>	92
Tabla 20 <i>Módulo G y τ_{max} promedio</i>	96
Tabla 21 <i>Propiedades físico-mecánicas de los materiales del FEM</i>	107
Tabla 22 <i>Resultados del estudio de convergencia de compresión del prototipo 1</i>	111
Tabla 23 <i>Resultados del estudio de convergencia de compresión del prototipo 2</i>	112
Tabla 24 <i>Resultados del estudio de convergencia de flexión del prototipo 1</i>	115
Tabla 25 <i>Resultados del estudio de convergencia de flexión del prototipo 2</i>	116
Tabla 26 <i>Factores de compensación para el esfuerzo máximo promedio de compresión</i>	126
Tabla 27 <i>Error porcentual entre el desplazamiento experimental y FEA</i>	126
Tabla 28 <i>Factores de compensación para el esfuerzo máximo promedio de flexión</i>	129
Tabla 29 <i>Error porcentual entre el desplazamiento experimental y FEA</i>	129

Tabla 30 <i>Índices del comportamiento mecánico calculados</i>	130
Tabla 31 <i>Índices de comportamiento mecánico calculados</i>	132
Tabla 32 <i>Datos para el cálculo de la carga axial admisible</i>	141
Tabla 33 <i>Datos para el cálculo de la carga lateral admisible</i>	142
Tabla 34 <i>Propiedades de los tableros estructurales tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,7 cm</i>	143
Tabla 35 <i>Propiedades de los tableros estructurales tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,5 cm</i>	143
Tabla 36 <i>Costo referencial por metro cuadrado del prototipo 1</i>	146
Tabla 37 <i>Costo referencial por metro cuadrado del prototipo 2</i>	146
Tabla 38 <i>Densidad de paredes de bloque</i>	148
Tabla 39 <i>Comparación de pesos por metro cuadrado</i>	148
Tabla 40 <i>Resistencia neta mínima a la compresión, en bloques</i>	149
Tabla 41 <i>Requisitos de resistencia mecánica y absorción de la humedad que deben cumplir los ladrillos cerámicos</i>	149
Tabla 42 <i>Valores de energía incorporada de varios materiales</i>	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evidencias de fallo por volcamiento de mampostería convencional en a) aulas Colegio San José en Manta, b) edificio de departamentos ubicado en Tarqui-Manta y c) Sala de observación en clínica privada Santa Lucía en Portoviejo	1
Figura 2 Mapa de zonificación sísmica del Ecuador	10
Figura 3 Densidad de productos elaborados a base de madera	14
Figura 4 Configuración de paneles CLT	17
Figura 5 Composición de la estructura tipo sándwich, representada en uno de los prototipos de tablero elaborados para el presente estudio	19
Figura 6 Plantación de <i>Dendrocalamus asper</i> en Quevedo-Ecuador	22
Figura 7 Panel laminado de bambú de CENBA.....	23
Figura 8 Paneles BALTEK® SB 100	25
Figura 9 Representación gráfica de los impactos ambientales resultantes del proceso de fabricación del bambú.....	33
Figura 10 Mayor presencia del bambú en las provincias del Ecuador.....	34
Figura 11 Ciclo de producción de CO ₂ del bambú.....	35
Figura 12 Distribución de las plantaciones de balsa en el Ecuador	36
Figura 13 Cascada potencial de productos de madera	38
Figura 14 Identificación de culmos maduros y jóvenes.....	40
Figura 15 Corte de culmo de bambú con sierra eléctrica.....	41
Figura 16 Corte de árboles de balsa	42
Figura 17 Diagrama de flujo del proceso de industrialización del bambú para convertirlo en laminados.....	43
Figura 18 Despuntado de bambú rollizo	43
Figura 19 Latillado de bambú rollizo.....	44
Figura 20 Denudado de latillas de bambú.....	44
Figura 21 Cepillado de latillas en 2 caras	45
Figura 22 Preservado de latillas de bambú	45
Figura 23 Presecado de latillas.....	46
Figura 24 Emparrillado de latillas.....	46

Figura 25 Horno de secado de latillas	47
Figura 26 Cepillado de una cara.....	47
Figura 27 Cepillado final en 4 caras	48
Figura 28 Armado y encolado de laminados.....	48
Figura 29 Prensado de laminados	49
Figura 30 Lijado de laminados de bambú	49
Figura 31 Diagrama de flujo del proceso de industrialización de la balsa para convertirlo en panel end-grain	50
Figura 32 Listones de balsa en horno de secado	50
Figura 33 Clasificación de listones de balsa	51
Figura 34 Bloques de listones de balsa	52
Figura 35 Producto final, panel de núcleo de balsa	53
Figura 36 Proceso de ensamblaje de tableros a) encolado de poliuretano en paneles y b) prensado de tableros	54
Figura 37 Ejes identificados en tableros estructurales tipo sándwich.....	56
Figura 38 Dimensiones nominales de muestras de densidad de paneles a) balsa e=89 mm, b) balsa e=44 mm y c) bambú.....	57
Figura 39 Identificación de muestras de densidad de paneles de balsa y bambú	59
Figura 40 Dimensiones nominales de muestras de densidad de tableros tipo sándwich a) prototipo 1 y b) prototipo 2.....	61
Figura 41 Dimensiones nominales de muestras de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2...64	64
Figura 42 Configuración del ensayo de compresión.....	66
Figura 43 Dimensiones nominales de muestras de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2.....	68
Figura 44 Configuración de ensayo de tracción.....	70
Figura 45 Dimensiones nominales de muestras de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	72
Figura 46 Configuración del ensayo de flexión	74
Figura 47 Dimensiones de muestras de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2.....	76
Figura 48 Configuración de ensayo de corte.....	78
Figura 49 Curvas Esfuerzo de compresión-deformación ensayo de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	84

Figura 50 Relación MOEL-densidad M.C 11%	85
Figura 51 Relación MORL -densidad M.C. 11%	85
Figura 52 Modo de falla en muestras representativas de compresión a) prototipo 1 vista frontal, b) prototipo 1 vista lateral, c) prototipo 2 vista frontal y d) prototipo 2 vista lateral	87
Figura 53 Curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2	89
Figura 54 Relación MOR_{trac} -densidad al contenido de humedad	89
Figura 55 Modo de falla en muestras representativas de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2	91
Figura 56 Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	93
Figura 57 Relación τ_{max} -densidad al 11% de contenido de humedad	94
Figura 58 Relación MOR_{flex} --densidad al 11% de contenido de humedad	94
Figura 59 Modo de falla en muestras representativas de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	96
Figura 60 Curvas τ_{max} -deformación ensayo de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2	97
Figura 61 Relación módulo G-densidad al 11% de contenido de humedad	98
Figura 62 Relación τ_{max} -densidad al 11% de contenido de humedad	98
Figura 63 Modo de falla en muestras representativas de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2 ..	100
Figura 64 Modelos de elementos finitos de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	106
Figura 65 Modelos de elementos finitos de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2	106
Figura 66 Resultados de convergencia de compresión del prototipo 1 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante	113
Figura 67 Resultados de convergencia de compresión del prototipo 2 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante	114
Figura 68 Resultados de convergencia de flexión del prototipo 1 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante	117
Figura 69 Resultados de convergencia de flexión del prototipo 2 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante	118
Figura 70 Falla esperada en FEM de compresión	119

Figura 71 Falla esperada en FEM de flexión	120
Figura 72 Gráfica de Módulo de Young contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso	121
Figura 73 Gráfica de Módulo de ruptura contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso	123
Figura 74 Distribución de esfuerzos de compresión en a) tablero estructural sándwich prototipo 1, b) tablero estructural sándwich prototipo 2, c) paneles externos de bambú prototipo 1, d) paneles externos de bambú prototipo 2, e) panel de núcleo de balsa prototipo	125
Figura 75 Distribución de esfuerzos de flexión del prototipo 2 en a) tablero estructural sándwich b) paneles externos de bambú y c) panel de núcleo de balsa	127
Figura 76 Distribución de esfuerzos de flexión del prototipo 2 en a) tablero estructural sándwich b) paneles externos de bambú y c) panel de núcleo de balsa	128
Figura 77 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en gráfica de Módulo de Young contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso	131
Figura 78 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en gráfica de Módulo de ruptura contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso	133
Figura 79 Fallas típicas por carga axial de compresión a) pandeo y b) aplastamiento de paneles externos y c) delaminación	134
Figura 80 Parámetros de la Ecuación de carga crítica por pandeo	135
Figura 81 Elementos utilizados para el cálculo de carga axial admisible (1) muestra ensayada experimentalmente y (2) tablero estructural tipo sándwich estándar	136
Figura 82 Modelamiento de tableros en SAP a) geometría y b) desplazamiento	139
Figura 83 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,7 cm de espesor a) carga axial admisible vs espesor total y b) carga lateral admisible vs espesor total	145

Figura 84 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,5 cm de espesor a) carga axial admisible vs espesor total y b) carga lateral admisible vs espesor total	145
Figura 85 Paredes de bloque elaboradas	147
Figura 86 Gráfica de la tasa de energía para la producción de materiales de construcción.....	152
Figura 87 Costo por metro cuadrado de materiales convencionales y prototipos propuestos	153
Figura 88 Eco-costo durante el ciclo de vida para varios materiales de construcción.....	155
Figura 89 Sistema constructivo de paneles estructurales aislados	156

RESUMEN

La recurrencia de eventos sísmicos a los que el Ecuador se encuentra expuesto, ha evidenciado deficiencias en el sistema constructivo actual, demostrando un bajo comportamiento mecánico-estructural de la mampostería tradicional compuesta en su mayoría por ladrillo y bloque. La presente investigación analiza el concepto de las estructuras tipo sándwich encontradas en la naturaleza, ejemplarizadas por la palma de coco, tomando sus ventajas de eficiencia mecánica, resistencia, flexibilidad y ligereza, a fin de proporcionar una solución estructural para edificaciones en regiones de alto riesgo sísmico del Ecuador. Se fabricaron dos prototipos de tableros estructurales tipo sándwich, compuestos por paneles externos de bambú (*Dendrocalamus asper*) y un panel ligero de balsa (*Ochroma pyramidale*), de los cuales se utilizaron 46 muestras para determinar sus propiedades mecánicas bajo cargas de compresión, flexión, tracción y corte basándose en la normativa ASTM para estructuras tipo sándwich; estas propiedades se validaron mediante el desarrollo de 40 análisis de elementos finitos en el programa LS-Dyna. La comparación de los resultados obtenidos con las características de los materiales convencionales en términos de resistencia, peso, costo e impacto ambiental, demuestran que los prototipos ensayados son estructuras livianas que presentan una resistencia de dos a tres veces mayor que el bloque y el ladrillo, una eficiencia mecánica entre siete y nueve veces superior que el hormigón y el acero, con un menor consumo energético y ambiental. Por consiguiente, su desarrollo e implementación apunta a un cambio positivo en el sistema constructivo, procesos de fabricación y prácticas sostenibles en la construcción.

PALABRAS CLAVE

- **BIOMATERIALES**
- **COMPORTAMIENTO MECÁNICO**
- **DENDROCALAMUS ASPER**
- **OCHROMA PIRAMIDALE**
- **EFICIENCIA MECÁNICA**
- **ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS**

ABSTRACT

The Ecuador's high seismic recurrence has deeply revealed deficiencies in the current construction system, which in turn reflects a low mechanical-structural behavior of traditional masonry composed mostly by bricks and cement blocks. The present investigation analyzes the concept of the sandwich structures found in nature; specifically in coconut palms, which unique stem structure gives them a mechanical efficiency, strength, flexibility and lightness, in order to provide a structural solution for buildings in high risk seismic regions of Ecuador. Two prototypes of structural sandwich panels were made, composed of external panels of bamboo (*Dendrocalamus asper*) and a lightweight balsa panel (*Ochroma pyramidale*), of which 46 samples were used to determine their mechanical properties under compression, bending, traction and cutting based on the ASTM standard for sandwich structures; these properties were validated through the development of finite element analysis in the LS-Dyna program. The comparison of the results obtained with the characteristics of conventional materials in terms of strength, weight, cost and environmental impact, show that the prototypes tested are light structures that have a resistance two to three times greater than the block and the brick, a mechanical efficiency between seven and nine times higher than concrete and steel, with lower energy and environmental consumption. Therefore, its development and implementation points to a positive change in the construction system, manufacturing processes and sustainable practices in construction.

KEYWORDS

- **BIOMATERIALS**
- **MECHANICAL PERFORMANCE**
- **DENDROCALAMUS ASPER**
- **OCHROMA PIRAMIDALE**
- **MECHANICAL EFFICIENCY**
- **FINITE ELEMENT ANALYSIS**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

Los sismos de gran magnitud que han tenido lugar hasta la fecha en Ecuador han demostrado, en la mayoría de los casos, que las estructuras convencionales generalmente con mampostería no reforzada de bloque y/o ladrillo, han sido las más afectadas y han producido pérdidas considerables de vidas humanas y materiales, comparadas con otros sistemas constructivos. El modo de fallo de este tipo de estructuras ha puesto en evidencia un comportamiento con muy poca ductilidad, debido a que el colapso se presenta de forma súbita. En este contexto, durante eventos sísmicos, la falla por volcamiento de mampostería constituye un alto riesgo para los habitantes de edificaciones; como se puede observar en la Figura 1, en la que la mampostería se desprendió producto de las sollicitaciones sísmicas. En la mayoría de casos, este tipo de falla (volcamiento) se relaciona con las deficientes características de su tipología constructiva.



Figura 1 Evidencias de fallo por volcamiento de mampostería convencional en a) aulas Colegio San José en Manta, b) edificio de departamentos ubicado en Tarqui-Manta y c) Sala de observación en clínica privada Santa Lucia en Portoviejo

Fuente: (Páez, 2016)

A pesar de este hecho, durante el proceso de post-terremoto de las zonas más afectadas como son Manabí y Esmeraldas, se observó que la reparación de las edificaciones que tuvieron afectación no se realizó de una manera técnica, volviendo a incurrir en errores como el uso de mano de obra no calificada y el uso de materiales convencionales contaminantes; además, los proyectos de reconstrucción no tomaron en cuenta los biorecursos locales que pueden ser utilizados como elementos de construcción con la finalidad de evitar efectos catastróficos en futuros eventos sísmicos (Páez, 2016).

1.1.1. Macro

La actividad sísmica tiene gran presencia en varias regiones de la geografía mundial, sobre todo en el Cinturón de Fuego y en la Falla de San Andrés; es decir, en la zona de Japón, Indonesia, toda la Cordillera de los Andes, la Costa del Oeste de Estados Unidos y Chile, principalmente.

La construcción en base a muros de mampostería no reforzada ha sido un problema para los continentes con una larga historia de civilización, como Europa y Asia, debido a que este tipo de sistema constructivo; si bien ya no es utilizado en construcción de nuevos edificios, constituye un número comparativamente grande del total de viviendas y edificaciones. Las estructuras con este sistema constructivo son rígidas con poca capacidad de flexión; además, los elementos estructurales de estos edificios a menudo están mal interconectados y se separan unos de otros, lo que resulta en un colapso catastrófico bajo fuerzas sísmicas (Magenes, 2006).

A nivel global, hace ya muchos años se reconoció la utilidad y la necesidad de obtener nuevos materiales de construcción. La conceptualización del uso de los nuevos materiales referidos ha pasado de un procesamiento básico de materias primas disponibles en la naturaleza hacia la formulación de biomateriales con base a sus características óptimas desde el punto de vista de mecánica-estructural. A la luz de este reconocimiento se concibieron nuevos procesos de fabricación, nuevas técnicas de caracterización e incluso nuevas disciplinas científicas, desarrollándose así paneles de fibra, ladrillos ecológicos, bio-paneles compuestos, entre otros, los

mismos que no solamente están dando una solución estructural sino que son amigables con el deteriorado ecosistema que tenemos en la actualidad (Guerrero et al., 2011).

La utilización de madera como material de construcción ha sido una de las soluciones que presenta más beneficios tanto en la parte estructural como en la ambiental. La construcción con madera utilizando estándares internacionales proporciona ventajas significativas en zonas sísmicas debido a sus óptimas propiedades mecánicas; esto significa que las fuerzas de inercia por unidad de masa que las estructuras de madera pueden absorber llegan a ser hasta 20 veces más altas comparadas con concreto reforzado (Kasal, Kruse, Rütther, & Polocoser, 2013). Por esta razón, los países desarrollados son los que emplean madera para la construcción de viviendas, edificios y estructuras. Además, son quienes más se están preocupando por el ambiente y la sostenibilidad de los procesos constructivos. Pero por efecto de deforestación, actualmente el uso de la madera como tal ha disminuido, lo que se ha hecho es desarrollar elementos constructivos que se derivan del procesamiento de desperdicios de varios biomateriales que toman el nombre de Engineered Wood Products (EWP), entre los cuales destacan: Cross Laminated Timber (CLT), Glued-Laminated Timber (GLULAM), Laminated Veneer Lumber (LVL), Veneer Based Composite (VBC), entre los más conocidos.

Las estadísticas mundiales indican que en Europa y Norteamérica un gran porcentaje de las construcciones de 1 a 3 niveles son fabricadas con estructuras de EWPs. No se puede dejar fuera casos como el de Japón (uno de los países con mayor riesgo sísmico del mundo) y el estado de California en Estados Unidos de Norte América, en los cuales se construye a gran escala con EWPs debido a sus propiedades estructurales y antisísmicas.

Cross laminated timber (CLT) es un sistema de construcción relativamente nuevo con gran aplicación en países como Inglaterra, Estados Unidos de Norte América, Canadá y Australia. Ésta es una solución basada en madera potencialmente competitiva en costos, que complementa los pórticos de madera y representa un elemento constructivo sustitutivo para aplicaciones que comúnmente utilizan concreto, acero y bloque; como es la mampostería (Gagnon & Karacabeyli, 2013).

La experiencia europea muestra que las construcciones con productos industrializados en base a EWP's pueden ser competitivas particularmente en edificios de mediana y gran altura. Su fácil manejo durante la construcción y un alto nivel de prefabricación facilitan la culminación rápida de proyectos; ésta es una ventaja clave, especialmente en construcciones de mediana altura (5 a 10 pisos). Edificios más ligeros construidos en base a EWP's resultan en cimentaciones menos voluminosas, buena aislación térmica, buen aislamiento acústico y buen comportamiento ante la presencia de fuego (Schickhofer, 2010).

1.1.2. Meso

Las construcciones con muros de mampostería no estructural, en América Latina, se realizan de manera poco técnica, debido al escaso control de calidad de los materiales utilizados, tanto en las unidades de mampostería que regularmente son fabricadas en hornos artesanales o semi-industriales. La baja calidad de los mampuestos se debe a que los componentes de estos no guardan los criterios mínimos de fiabilidad en resistencia; de igual manera el mortero que regularmente es una pasta de cemento, elaborada en obra sin considerar dosificaciones apropiadas que generen una unión adecuada entre las unidades de mampostería (Páez, 2016).

De acuerdo a Lavell (2005), la devastación causada por los desastres naturales en los países en vía de desarrollo tiene una relación directa con los procesos de desarrollo de la región y sus consecuencias en términos de pobreza, desigualdad, exclusión social, sistemas constructivos y uso adecuado del territorio, entre otros. Estos factores hacen que América Latina resulte incapacitada para absorber o recuperarse de los impactos de los eventos físicos externos, como son los terremotos.

Chile, el país más sísmico de Latinoamérica, demuestra que estrictos códigos de construcción y normas pueden reducir considerablemente las pérdidas y la destrucción, incluso en terremotos de gran intensidad. En el terremoto masivo de 8,8 grados de magnitud en la escala de Richter ocurrido el 27 de Febrero de 2010 a pesar de que produjo daños extendidos, el número de

muertos fue relativamente pequeño (486 fallecidos) (Contreras & Winckler, 2013), a comparación con el terremoto de 7,0 grados de magnitud en Haití ocurrido el 12 de Enero de 2010, el cual resultó en la muerte de más que 200.000 personas (Vargas, 2010).

Además, el comportamiento adecuado de las estructuras chilenas no solamente obedece a la rigurosa normativa y a la utilización de nuevas tecnologías para minimizar daños en infraestructuras, como aisladores sísmicos y disipadores de energía, sino también al apoyo gubernamental que en el 2001 empezó a fomentar el uso de la madera en el campo estructural, creando manuales para el correcto diseño de edificaciones, dando como resultado que a la fecha actual la construcción con madera represente el 17% de las edificaciones totales de Chile (Salazar, 2014).

1.1.3. Micro

El sistema constructivo aporticado es el más utilizado en el Ecuador y en muchos países de América Latina, sistema caracterizado por ser un conjunto esquelético de vigas y columnas, considerando a la mampostería como elemento secundario en la estructura y construyéndola con una limitada función de cerramiento o detalle arquitectónico; es decir que no está diseñada para soportar cargas sísmicas, por lo que al construirla no tiene una conexión suficiente con la estructura aporticada (Páez, 2016). Este tipo de construcción no corresponde a la realidad sísmica del país y consecuentemente, se han hecho propuestas de mejora del sistema constructivo convencional para optimizar su comportamiento (Espinosa Cazarín, Terán Gilmore, Zúñiga Cuevas, & Perilliat, 2014; León, 2013; Minke, 2001; SHRIVE, Masia, & Lissel, 2001), pero sin tomar en cuenta los materiales no-convencionales que pueden proporcionar los resultados óptimos en cuanto a comportamiento mecánico-estructural.

En el terremoto de magnitud de 7,8 grados en la escala de Richter ocurrido el 16 de abril de 2016 con epicentro en Pedernales, se evidenció el bajo comportamiento de la mampostería identificándose las siguientes fallas: por separación, aplastamiento de esquina, agrietamiento inclinado y volcamiento total o parcial. Estas fallas de mampostería presentadas durante el sismo

se convirtieron en un indudable riesgo para las personas que se encontraban en el interior de las edificaciones (Panchi, 2013).

Adicionalmente en el proceso de reparación o reconstrucción de los edificios afectados, tanto la mampostería como los elementos estructurales, se siguieron utilizando los mismos materiales convencionales, siendo evidente la poca preocupación del Gobierno y los propietarios en cuanto a reforzar y reparar sus bienes de una manera óptima (Raigosa, 2010).

El uso de materiales convencionales en el Ecuador ha provocado que la industria de la construcción sea la segunda del país (siendo la industria manufacturera la primera) en producir mayores emisiones de gases contaminantes como son :monóxido de carbono (CO), carbono orgánico total (COT) ,compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (Nox), que en promedio genera 319.402 toneladas de gases al año, cifra que va en aumento debido a que las prácticas actuales para reducir los contaminantes o emisiones de gases son ineficaces (Ministerio del Ambiente, 2014).

A diferencia de otros países como Chile, Estados Unidos, Canadá, Australia, Inglaterra, entre otros, en el Ecuador no se ha desarrollado la industria de madera estructural, ni se explota de manera técnica la gran potencialidad de otros biomateriales, y esto se podría atribuir en parte a la poca demanda de elementos estructurales de madera por parte de los arquitectos e ingenieros civiles diseñadores de viviendas, los cuales hacen uso preferencial del concreto armado como material estructural de soluciones habitacionales. Por lo que las aproximadamente 7 millones de hectáreas de bosques maderables, en las cuales podemos encontrar especies como, Chanúl, Seike, Fernán, entre otras, no están siendo explotadas de forma óptima (Salazar, 2014).

El tener un recurso renovable como la madera y no explotar las reales posibilidades que tiene en el campo de los elementos estructurales es un efecto resultante de la falta de investigación, en cuanto a la utilización de biomateriales para creación de soluciones estructurales y la falta de tecnología para su procesamiento óptimo. Por lo tanto, los resultados de esta investigación buscan dar respuesta al comportamiento estructural de un material biocompuesto frente a los esfuerzos de

compresión, tracción, corte y flexión; determinando así la posibilidad de su uso en proyectos que apliquen criterios de construcción sostenible, incorporando las nuevas tendencias y soluciones estructurales mundiales relacionadas con aspectos ambientales de construcción.

1.2. Antecedentes

De acuerdo a Hibsich, Alvarado, Yepes, Sebrier, and Pérez (1996), en el Ecuador se nota una recurrencia de terremotos con magnitudes superiores a 7 grados en la escala de Richter, debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, por lo tanto el Ecuador ha sido clasificado como una de las zonas de alto peligro sísmico en el mundo.

Según Rivadeneira et al. (2007), la historia sísmica del Ecuador está llena de dolorosas experiencias. En los últimos 458 años han ocurrido en nuestro territorio 37 terremotos de intensidad igual o mayor a VIII MM (Mercalli Modificada), grado a partir del cual sus efectos se catalogan entre considerables y catastróficos (ver Tabla 1). Como ejemplos se destacan el terremoto de 1949 en la provincia de Tungurahua con una intensidad X y el ocurrido en Esmeraldas en 1906 de una intensidad de IX. Si se toma en cuenta los sismos a partir de la intensidad VI (grado desde el cual se presentan daños leves), se debe añadir 96 eventos sísmicos más.

El evento sísmico más reciente ocurrió el 16 de abril de 2016 en la Costa Ecuatoriana entre las provincias de Esmeraldas y Manabí. La magnitud de evento fue de 7,8 escala de Richter, equivalente a una intensidad XI en la escala de Mercalli Modificada, como se muestra en la Tabla 1. Como consecuencia del terremoto 663 personas resultaron muertas, 6.274 heridas y 28.775 albergadas. Además 35.300 viviendas fueron afectadas, de las cuales 19.500 resultaron totalmente destruidas o demolidas, afectando así a zonas de alta vulnerabilidad física y socioeconómica, con altos niveles de pobreza, de acuerdo a la información publicada en el último informe de la Secretaría de Gestión de Riesgos (2016).

Tabla 1
Comparación de escala Richter y Mercalli modificada

ESCALA DE RICHTER	ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLÍ MODIFICADA	PERCEPCIÓN
< 3,4	I - Muy débil	Imperceptible por el ser humano
3,5 - 4,2	II - Débil	Objetos suspendidos oscilan
	III - Leve	Carros se mueven ligeramente
4,3 - 4,8	IV - Moderado	Vibran las ventanas
4,9 - 5,4	V - Poco fuerte	Cristales de ventanas se rompen
5,5 - 6,1	VI - Fuerte	Caída de revestimientos y muebles
	VII - Muy fuerte	Grietas en mampostería
6,2 - 6,95	VIII - Destructivo	Daño de consideración o caída de mampostería
	IX - Muy destructivo	Daño y colapso de estructuras aporticadas
7,0 - 7,3	X - Desastroso	Daño severo en puentes y diques
7,4 - 7,9	XI - Muy desastroso	Pocas o ninguna estructura en pie
> 8	XII - Catastrófico	Destrucción total

Fuente: Modificado de Stein and Wysession (2009).

Los peligros sísmicos de alta magnitud a los que se encuentra expuesto el Ecuador causan gran efecto en la población y en los proyectos de infraestructura. La vulnerabilidad de las edificaciones que fueron afectadas durante el evento sísmico del 16 de abril de 2016, son consecuencia del uso de materiales de baja calidad, cálculo y diseños precarios de las construcciones y uso escaso de tecnología moderna que permita desarrollar proyectos de acuerdo a las exigencias de ingeniería y de medio ambiente. Todos estos problemas se engloban dentro del sistema constructivo predilecto en el Ecuador, el cual es a base de concreto y acero (referidos como materiales convencionales en este estudio).

El concreto es el material de construcción con un amplio uso alrededor del mundo. El término “concreto” se refiere a una mezcla de agregados, usualmente arena y grava, que se mantienen juntas por una pasta de cemento, que está típicamente está hecha de cemento portland y agua. La construcción con concreto proporciona varias ventajas en el diseño de estructuras como gran cantidad de rigidez, resistencia a esfuerzos de compresión, flexión, corte y tracción, durabilidad y versatilidad (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2011).

El problema radica en que, aunque desde hace muchos años se realizan proyectos de construcción con materiales convencionales, sólo las estructuras de edificaciones importantes, como bloques multifamiliares y la mayoría de viviendas de los sectores de alto nivel económico, cumplen tanto en diseño como en sistema constructivo con los requerimientos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Las viviendas unifamiliares de la clase media y baja en el Ecuador generalmente no cumplen las condiciones de resistencia necesaria y lo que presentan es una simple apariencia de concreto armado y escasamente se las construye con acero (Páez, 2016).

Adicional a lo antes citado, es conocido que los materiales de construcción convencionales inciden negativamente en la contaminación del medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida, desde la fase de extracción y procesamiento de materias primas, hasta el final de su vida útil; es decir, hasta su tratamiento como residuo (Symonds & COWI, 1999), dando como resultado que el acero y el concreto sean 20 y 9 veces más intensivos en emisiones de CO₂ (comparado en términos de masa) que la madera estructural (Gregg, Andres, & Marland, 2008).

Existe, sin embargo, una serie de materiales y productos desarrollados a partir de bio-recursos renovables como son el bambú, coco, balsa, corcho (por mencionar algunos) que, al ser utilizados como sustitutos de productos no renovables, nos ofrecen una alternativa para reducir el agotamiento de los recursos y la huella de carbono al medio ambiente. La mayoría son bajos en compuestos orgánicos volátiles o directamente no contienen ninguno, por lo que también mejoran la calidad ambiental (De Mena, 2015).

Por lo anteriormente indicado, al evidenciarse las deficiencias del actual sistema constructivo del Ecuador, la infraestructura no ha tenido un comportamiento óptimo ante eventos sísmicos, por lo cual es necesario aumentar el control con respecto a procesos constructivos o buscar alternativas en materiales no convencionales (biomateriales de diferentes especies o materiales compuestos procesados de los mismos biomateriales) que proporcionen las mismas o mejores características que los utilizados en la actualidad; y, que además, contribuyan con la construcción sostenible dentro del país, con su consecuente impacto positivo al medio ambiente.

1.3. Área de influencia

De acuerdo al capítulo de Peligro Sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (2014) la principal fuente de energía sísmica en el Ecuador es producida por la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, a esto se le añade un complejo sistema de fallas corticales que producen sismos importantes en gran parte del territorio ecuatoriano.

En la Figura 2 se presenta el mapa de zonificación sísmica del Ecuador, donde se identifica con color rojo a la región costera del país por ser la zona de mayor vulnerabilidad sísmica, ya que las solicitaciones sísmicas registradas en esta zona han alcanzado aceleraciones mayores de 0,5g (aceleración en proporción de la aceleración de la gravedad); la zona central del país, identificada con color tomate y amarillo presenta aceleraciones de entre 0,4 y 0,35 g; y finalmente la zona oriental del país identificada con color verde presenta aceleraciones de 0,15 a 0,30 g (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014).

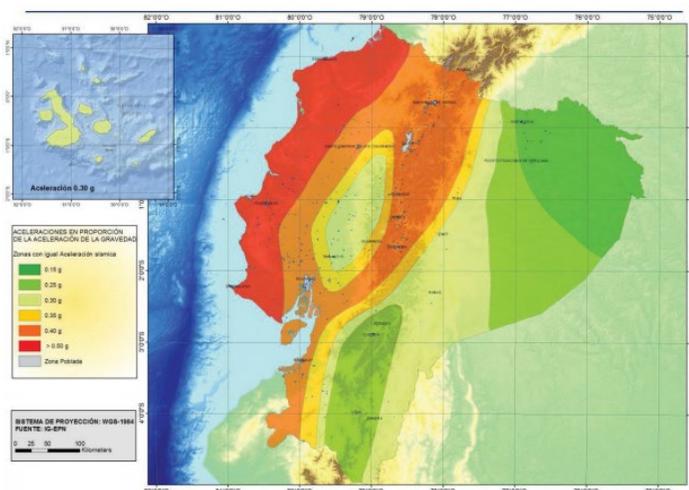


Figura 2 Mapa de zonificación sísmica del Ecuador
Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

1.4. Justificación e Importancia

El terremoto de Pedernales del 16 de abril del 2016 con una magnitud de 7.8 en la escala de Richter recordó la vulnerabilidad de las construcciones ante eventos sísmicos y la importancia

que tiene la investigación sobre nuevos materiales sismo-resistentes que puedan ser confiables para ingenieros, empresas y constructoras de la actualidad.

La investigación a realizarse busca obtener una propuesta de tablero estructural compuesta por biomateriales que represente una alternativa viable de mampostería no solamente en términos de comportamiento mecánico-estructural sino en términos de recursos, precio, tecnología, tiempo de construcción; y lo más importante, en términos de contaminación ambiental.

La propuesta está orientada a beneficiar a la población de las provincias de Esmeraldas, Santo Domingo de los Tsáchilas, Manabí, Guayas, Los Ríos y Santa Elena. A través de la utilización de los productos forestales de estas zonas como el bambú y la balsa, se pretende implementar prácticas correctas de edificación sustentable; y a su vez, disminuir las emisiones de gases contaminantes producto de la elaboración de materiales de construcción.

Además, el uso de biomateriales en la presente investigación pretende ser un punto de partida para la identificación y desarrollo de nuevos procesos de fabricación, nuevas técnicas de caracterización e incluso nuevas disciplinas científicas dentro del país; pues la ingeniería biomecánica y biomimética aplicada a sistemas constructivos, aún no ha sido desarrollada en el Ecuador y en muchos países de la Región Andina.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Plantear un prototipo de tablero estructural compuesto tipo sándwich constituido en base a paneles externos bidireccionales de bambú (*Dendrocalamus asper*) y un núcleo de balsa (*Ochroma pyramidale*), como alternativa de mampostería no-convencional, mediante la determinación de sus propiedades físico-mecánicas y análisis biomecánico, para su utilización en zonas de alta peligrosidad sísmica del Ecuador.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de la literatura existente, mediante la lectura y análisis de artículos científicos, normas y libros relacionados con el presente estudio.
- Realizar un prototipo de tablero estructural biocompuesto, combinando las propiedades físicas y mecánicas de los biomateriales bambú (*Dendrocalamus asper*) y balsa (*Ochroma pyramidale*).
- Caracterizar física y mecánicamente los paneles propuestos, mediante la realización de ensayos de laboratorio con la aplicación de la normativa ASTM para estructuras tipo sándwich.
- Realizar el modelamiento y análisis finito de elementos de los tableros, mediante la utilización del programa LS_DYNA, para la validar el comportamiento mecánico-estructural obtenido experimentalmente.
- Verificar el comportamiento mecánico y estructural de los prototipos en estudio, mediante la comparación de las propiedades obtenidas con las requeridas por la normativa para su certificación como alternativa de mampostería, así como la comparación con un mampuesto convencional en base a bloques de cemento.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes investigativos

Los materiales compuestos se obtienen de la combinación macroscópica de dos o más materiales distintos, separados por una interfase reconocible. Muchos de estos materiales son encontrados en la naturaleza como la madera y los huesos, sin embargo, un alto porcentaje de los materiales compuestos utilizados en la actualidad son fabricados por el hombre (Stupenengo, 2011).

Los materiales compuestos se dividen en tres categorías: reforzados con partículas, reforzados con fibras y estructurales, dentro de esta última categoría se encuentran los laminados y las estructuras tipo sándwich.

Las estructuras tipo sándwich son un principio común en la naturaleza, por lo tanto, es el concepto es más antiguo que la humanidad misma. Las ramas de los árboles son un claro ejemplo de estructura tipo sándwich con núcleo de espuma, los huesos en los esqueletos de los animales y seres humanos son estructuras sándwich con materiales de núcleo similares a la espuma también (Herrmann, Zahlen, & Zuardy, 2005).

El uso de las estructuras tipo sándwich ha venido incrementando rápidamente en aplicaciones que van desde satélites, aviones, barcos, automóviles, vagones, sistemas de energía eólica y construcciones de puentes, por mencionar algunos. Todo esto debido a que este tipo de estructuras logra ser lo más ligera posible sin sacrificar su resistencia (Vinson, 2005).

En el estudio realizado por Heiko (2007), titulado “Paneles ligeros: resumen de un nuevo desarrollo en Europa”, se describe la importancia de la construcción ligera en términos de mejorar la funcionalidad de las estructuras, reducir su costo y su impacto ambiental, mediante la utilización

de materiales elaborados a base de madera de baja densidad. Uno de los resultados de este estudio fue la clasificación de paneles a base madera con su respectiva densidad (Ver Figura 3), partiendo de paneles de madera sólida de balsa cuya densidad varía entre 180 kg/m^3 y 1300 kg/m^3 , pasando por paneles MDF con una densidad aproximada de 700 kg/m^3 y con la menor densidad paneles de núcleo de espuma con una densidad aproximada de 180 kg/m^3 , estos junto con los paneles de nido de abeja, tablero tubular, MDF ultraligero, panel de núcleo y el plywood son considerados como materiales ligeros debido a que su densidad es menor a 500 kg/m^3 .

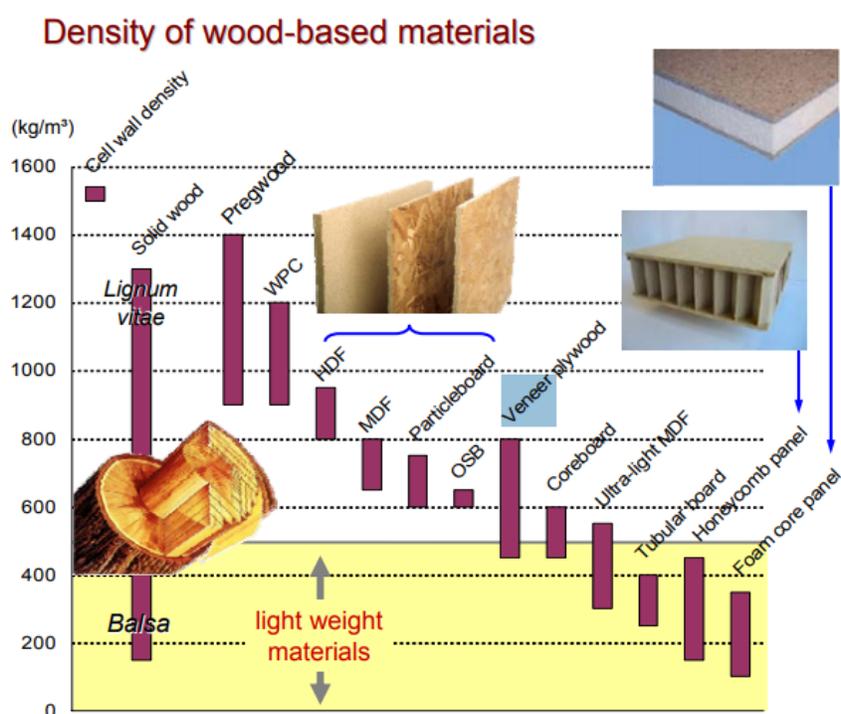


Figura 3 Densidad de productos elaborados a base de madera
Fuente: Tomado de Heiko (2007)

El reconocimiento de las densidades de los productos elaborados a base de madera es de relevancia para el presente estudio, ya que permite tener el punto de partida para la creación de tableros estructurales tipo sándwich elaborados a base de un panel de núcleo rígido de balsa y paneles externos bidireccionales de bambú cuya densidad se encuentre dentro del rango de materiales ligeros.

Tableros estructurales compuestos de OSB (Oriented Strand Board) y poliestireno expandido fueron investigados por Rungthonkit (2012), como parte de los paneles estructurales aislados SIPs por sus siglas en inglés, en su estudio describe la importancia y las ventajas que tiene la construcción con tableros estructurales tipos sándwich, además de describir la metodología experimental, analítica y numérica para determinar el comportamiento mecánico de los mismos bajo cargas de corto plazo y largo plazo en una y varias direcciones, basándose en la teoría de las estructuras tipo sándwich. Este estudio servirá como guía para la correcta realización de ensayos experimentales, modelos de elementos finitos y determinación de las cargas admisibles de los tableros estudiados en la presente investigación.

2.2. Fundamentación teórica

Los materiales naturales (referidos como biomateriales en este estudio) son remarcablemente eficientes, debido a que satisfacen los complejos requisitos mecánicos planteados por la forma en que funcionan, y lo hacen utilizando el menor material posible. Muchos de estos requerimientos son: soportar cargas estáticas y dinámicas creadas por la masa del organismo o por cargas de viento, almacenar y liberar energía elástica, doblarse en grandes ángulos y resistir pandeo y fractura (U. Wegst & Ashby, 2004).

Las estructuras con formas óptimas encontradas en la naturaleza que utilizan la menor cantidad de material y tienen un alto comportamiento mecánico para realizar sus funciones son las estructuras tubulares y las estructuras tipo sándwich (Gonzalez & Nguyen, 2016): las estructuras tubulares, encontradas en tallos huecos, troncos, culmos de bambú y palmas, entre otros, son estructuras ligeras y cuando el modo de carga es flexión y la dirección de carga es desconocida se comportan mejor que otras formas (U. Wegst & Ashby, 2004). Un ejemplo sobresaliente de este tipo de estructuras es la palma de coco, cuya distribución no uniforme de haces fibrovasculares y su distribución axisimétrica de densidad le permite resistir a condiciones extremas, como huracanes, tornados y tsunamis, sin una falla significativa (González & Nguyen, 2016).

Por su parte las estructuras tipo sándwich se las utiliza cuando el ahorro de peso es crítico y el comportamiento mecánico es esencial ante la eminente recurrencia de eventos sísmicos. En la

naturaleza las estructuras tipo sándwich pueden encontrarse en secciones de cráneo humano, alas de pájaros, y el tallo y hojas de muchas plantas, que muestran un núcleo de espuma de baja densidad que separa las caras sólidas externas (Castejón, Jiménez, & Miravete, 1997).

2.2.1. Biomateriales

Los biomateriales, entre otras ventajas, permiten plantear propuestas poco contaminantes y también accesibles a personas de escasos recursos económicos. Entre las especies que pueden ser consideradas en aplicaciones para la industria de la construcción, están la balsa y el bambú.

La balsa (*Ochroma pyramidale*) es una especie tropical conocida por su ligereza y flexibilidad, cuya densidad básica de entre 100-150 kg/m³ la convierte en un biomaterial perfecto para construcción de paneles tipo sándwich, ya que brinda un ahorro de peso con una resistencia a la tracción y a la compresión muy alta, que se mantiene en un amplio rango de temperaturas y es uniforme en todas las direcciones planas. El núcleo es estable bajo condiciones cambiantes de temperatura y absorbe poca humedad a través de sus caras expuestas (White, 1956).

El bambú gigante (*Dendrocalamus asper*), es un ejemplo de estructura tubular, presenta una eficiente combinación de resistencia y rigidez con relación a su peso, características que son importantes para el diseño estructural de estructuras de alta resistencia en flexión y torsión. Su resistencia a esfuerzos puede ser mejorada aún más al conformarse paneles cross laminated timber (Tan et al., 2011).

2.2.2. Engineered Wood Products

Engineered Wood Products (EWP) son un grupo de productos manufacturados de madera, que tienen el objetivo de crear nuevos productos destinados a aplicaciones estructurales según estándares prescritos. Entre las categorías de los EWPs, de acuerdo a diferentes usos estructurales, se puede mencionar los siguientes: Glued-Laminated Timber (GLULAM), Laminated Veneer Lumber (LVL), Cross-Laminated Timber (CLT), Veneer Based Composite (VBC), por mencionar

algunos (Williams, 2002). Este estudio base parte de su investigación en la fundamentación mecánico-estructural de los CLTs.

Cabe recalcar que los EWP's pueden ser elaborados de biomateriales de desperdicio o biomateriales que en su estado natural no ofrecen una aplicación estructural, sin embargo, al ser tratados se puede mejorar sustancialmente sus características mecánicas para ser utilizados con diferentes fines estructurales.

2.2.3. Cross laminated timber

Son paneles de madera maciza prefabricada y de gran tamaño, ligero pero muy resistente, con un comportamiento superior acústico, sísmico, térmico y resistente al fuego, a su vez es rápido y fácil de instalar, sin desperdicio in situ, ofrece flexibilidad de diseño y bajo impacto ambiental (Williams, 2002).

Un panel CLT consta de varias capas de madera seca acopladas en direcciones alternas, unidas con adhesivos estructurales y prensadas para formar un panel sólido, recto y rectangular como se indica en la Figura 4, por lo general tienen un número impar de capas (entre tres y siete), se cortan a la medida y pueden lijarse o pre acabarse antes de ser utilizadas (Williams, 2002).

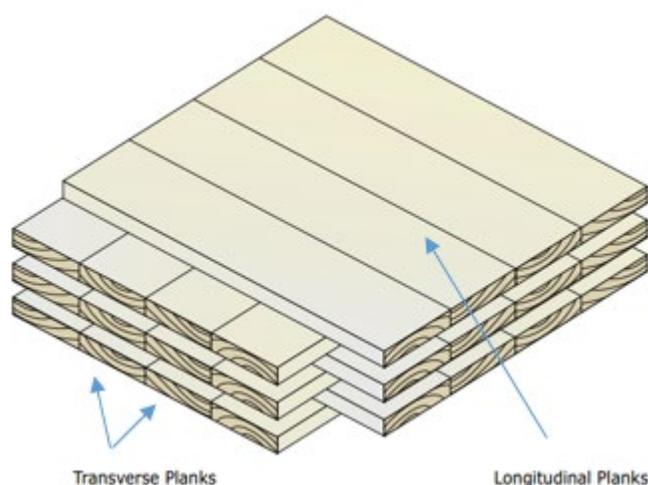


Figura 4 Configuración de paneles CLT
Fuente: (Karacabeyli and Douglas, 2013)

La naturaleza prefabricada de los CLTs permite una mayor precisión y un proceso de construcción caracterizado por una culminación más rápida, incremento de la seguridad, menor desperdicio y disminución de la demanda de trabajadores especializados en el sitio de construcción. El CLT como sistema constructivo es bastante adaptable, teniendo un comportamiento óptimo en pisos de tramos largos, paredes y techos. Además, su habilidad para ser utilizado como panel o como sistema modular lo hacen ideal para usos en construcciones existentes, es decir, que puede ser usado conjuntamente con otro material constructivo como pórticos de madera, acero o concreto (Karacabeyli & Douglas, 2013).

2.2.4. Tableros estructurales tipo sándwich

La fundamentación mecánica de las bio-estructuras tipo sándwich ha permitido plantear soluciones estructurales con propiedades óptimas de rigidez y resistencia, lo cual ha permitido desarrollar una tecnología específica de materiales compuestos, en la que se combinan distintos tipos de materiales.

Un tablero estructural tipo sándwich compendia el concepto de un híbrido, ya que combina dos materiales en una geometría y escala especificada; está constituido, básicamente, por los tres elementos mostrados en la Figura 5 y que se citan a continuación:

- Dos paneles externos delgados y resistentes que pueden ser de distintos espesores y materiales.
- Un núcleo grueso y ligero que separa las pieles, a la vez que les brinda estabilidad y cuya misión es transmitir acciones mecánicas de una piel a otra.
- Un adhesivo que conecta pieles y núcleo, capaz de transmitir cargas axiales y de cizalladura entre partes unidas.



Figura 5 Composición de la estructura tipo sándwich, representada en uno de los prototipos de tablero elaborados para el presente estudio

La separación de las caras incrementa el momento de inercia de la sección I y el módulo de sección Z , produciendo una estructura que resiste bien cargas de flexión y pandeo.

Los paneles externos, cada una de un espesor t , soportan la mayor parte de la carga, así que estos deben ser rígidos y fuertes; y al formar parte de las superficies exteriores deben ser capaces de tolerar el medioambiente en el que operan.

El núcleo, de espesor c , ocupa la mayor parte del volumen, debe ser ligero, y lo suficientemente rígido y fuerte como para soportar esfuerzos de corte y flexión, cualidades necesarias para hacer que el panel entero se comporte como una unidad de carga.

El interés de la utilización de paneles estructurales tipo sándwich en proyectos de construcción se debe a que conducen a estructuras que son ligeras, rentables y duraderas. En el pasado los paneles tipo sándwich han sido comúnmente utilizados en aplicaciones aeronáuticas, y en los años recientes, han sido utilizados como elementos estructurales en muchos edificios industriales y de oficinas en Europa y Estados Unidos. Aparte de su comportamiento mecánico óptimo, los paneles estructurales tipo sándwich son bastante eficientes en aislamiento térmico y acústico (Narayan Pokharel, 2003).

2.2.5. Hardwoods, Softwoods y Palmwoods

La madera es un material biológico complejo que se deriva del cambio vascular y se desarrolla en los tallos y raíces de la mayoría de las gimnospermas y muchas angiospermas como consecuencia del crecimiento secundario. La madera usualmente se divide en dos grupos principales softwoods y hardwoods.

La madera de las gimnospermas es referida como softwood y está formada predominantemente de traqueidas. Con solo una pequeña cantidad de parénquima presente, por lo tanto, es una madera relativamente fácil de trabajar. Por otro lado, la madera de las angiospermas dicotiledóneas contiene una gran variedad de tipos de células, incluyendo fibras de pared ancha, esta madera es a veces difícil de trabajar por lo que el término hardwood se ha aplicado para identificarla. Los términos hard y soft son engañosos por cuanto maderas de textura blanda y dura se pueden encontrar en ambos grupos de plantas, un ejemplo de esto es la madera de balsa (*Ochroma* sp), la cual a pesar de tener textura muy suave es una angiosperma y por lo tanto constituye un hardwood por definición (Butterfield, Meylan, & Peszlen, 1997).

Dentro de la familia de las monocotiledóneas se encuentran los palmwoods, a pesar que estas plantas no producen madera en sentido usual de la palabra, sus tallos son físicamente duros y pueden crecer de 20-60cm o más en diámetro. Los tallos de los palmwoods comprenden un gran núcleo central de haces vasculares primarios incrustados en un tejido parenquimatoso rodeado por una corteza, debido a esto en algunas palmas la densidad básica disminuye a medida que aumenta la altura del tallo y aumenta desde el centro del tallo hacia afuera, como es el caso de la palma de coco y del bambú (González, 2018).

2.2.6. Bambú Gigante (*Dendrocalamus asper*)

En el mundo existen alrededor de 1500 especies de bambú, de estas el 64% se encuentran en Asia, 33% en América Latina y el 7% restante crecen en regiones de África y Oceanía. En el Ecuador se han registrado 44 especies endémicas, distribuidas en siete géneros:

Arthrostylidium con, *Aulonemia con,* *Chusquea,* *Guadua,* *Neurolepis,* *Phipidocladum* y *Rhipidocladum*; y entre las especies introducidas se puede mencionar *Bambusa tulda* (bambú de la India), *Bambusa ventricosa,* *Dendrocalamus asper* (bambú gigante), *Dendrocalamus latiflorus* y *Dendrocalamus longispiculata* (Añazco & Rojas, 2015).

Taxonómicamente (clasificación de bio-organismos y especies, en diferentes familias, ramas y conjuntos de razas, de acuerdo a características compartidas), el bambú gigante es una especie de palmwood que pertenece a la familia *Poaceae* o de las Gramíneas y a la subfamilia *Bambusoideae*, que se divide en dos grupos: los *Herbáceos* u *Olyredae* y los leñosos o *Bambusodae*. Dentro de la familia de leñosos se encuentra el *Dendrocalamus asper* mejor conocido como bambú gigante (García, 2013).

La especie *Dendrocalamus asper* tiene grandes tallos leñosos entre 20-30 m de altura y 8-20 cm de diámetro, y tiene paredes relativamente gruesas (11-20 mm) que se vuelven más delgadas hacia la parte superior del culmo. Los culmos inferiores muestran raíces aéreas (raicillas) de los nodos. Los entrenudos del culmo tienen 20-45 cm de largo, son de color verde pálido y están cubiertos de pelos cortos de color marrón (Schröder, 2010).

El bambú gigante (*Dendrocalamus asper*) se introdujo en Ecuador hace aproximadamente 90 años por investigadores para proyectos de desarrollo agropecuario. Esta especie de bambú es originaria de Asia Meridional y es más grande (más ancha y más alta) que las especies de bambú nativas, que es una de las razones por las que los investigadores introdujeron la planta. Actualmente es una de las especies con mayor crecimiento en el sector industrial para la producción de alternativas de madera debido a su rápido crecimiento y propiedades óptimas como material de construcción (Humphries & Cabrera, 2010). La Figura 6 muestra una plantación de esta especie en Ecuador, ubicada en el Grupo de Fuerzas Especiales N°26 “CENEPA”, Provincia de los Ríos, ciudad de Quevedo.



Figura 6 Plantación de *Dendrocalamus asper* en Quevedo-Ecuador

En el estudio desarrollado por Armendáriz, Vinicio, Álvarez, and Aníbal (2011), se determinó que las propiedades mecánicas del *Dendrocalamus asper* proveniente de la provincia de Manabí-Ecuador, son las que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Propiedades mecánicas del bambú Dendrocalamus asper.

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL BAMBÚ			
ESPECIE	EDAD APROX.	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD BÁSICA (Kg/m³)
<i>Dendrocalamus asper</i>	5-7 años	54	640,00
TRACCIÓN PARALELA (MPa)	COMPRESIÓN PERPENDICULAR (MPa)	FLEXIÓN PERPENDICULAR (MPa)	
127,08	99,41	15,66	
MODULO DE TRACCIÓN PARALELA (MPa)	MODULO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR (MPa)	MODULO DE FLEXIÓN PERPENDICULAR (MPa)	
5,70	18327,19	19322,05	

Fuente: (Armendáriz et al., 2011)

La industrialización del bambú es un proceso relativamente nuevo en el Ecuador. En el país existen pocas empresas que se dedican a su procesamiento. Sin embargo, hace 4 años la Central del Bambú Andoaz (CENBA) empezó a producir productos derivados del bambú, como alternativa a la madera. La Empresa se especializa en laminados de bambú como se indica en la Figura 7, utilizando las especies de bambú *Guadua angustifolia* y *Dendrocalamus asper*, pero no cuenta con estudios de las propiedades mecánicas de sus productos por lo que el mercado de sus tableros es para muebles, artesanías, paredes y pisos.



Figura 7 Panel laminado de bambú de CENBA

El presente estudio pretende dar un uso estructural a los paneles laminados de bambú (*Dendrocalamus asper*) fabricados en CENBA, al formar paneles CLT para su utilización como paneles externos del tablero estructural tipo sándwich propuesto.

2.2.7. Balsa (*Ochroma pyramidale*)

La *Ochroma pyramidale* es una especie de hardwood que pertenece a la familia *Malvaceae*. Es un árbol originario de América, se puede encontrar desde México, pasando por Centroamérica y llegando hasta Colombia, Venezuela, Brasil, Ecuador, Perú y Bolivia (Rojas & Torres, 2008).

Se trata de un árbol que puede alcanzar los 35 metros de alto, con troncos que varían en cuanto a su diámetro, pero que pueden alcanzar casi el metro de circunferencia. Al ser una especie que crece en tan solo 4 años, la balsa puede ser distribuida a todo el mundo sin sufrir deforestación o peligro de extinción (Ramos, 2016).

La madera de balsa tiene propiedades sobresalientes únicas en el campo de la madera, debido a que su densidad básica puede variar entre 40 y 380 kg/m³ en relación con su edad y hábitat, por lo que es una de las maderas más ligeras disponibles. Su estructura celular ofrece una combinación de alta rigidez y resistencia a la compresión y a la tracción, la cual es superior a cualquier material compuesto o sintético de igual o mayor densidad (Da Silva & Kyriakides, 2007).

Ecuador es uno de los principales productores y exportadores de balsa, siendo la provincia de los Ríos el área productora del 36% del total de la producción total del País. A nivel nacional la demanda es muy pequeña, solamente el 10% es utilizado para elaborar artesanías y maquetas, mientras que el 90% de la producción se destina a la exportación (Moncayo, 2017).

La Empresa PLANTABAL S.A. del grupo 3A COMPOSITES es la más importantes en cuanto a producción de balsa en el Ecuador, por sus 70 años de experiencia en el mercado internacional y sus certificaciones FSC (Forest Stewardship Council) en Manejo Forestal y en Cadena de Custodia de la madera de balsa. Adicionalmente PLANTABAL S.A. está en constante desarrollo de nuevos productos orientados a ampliar el rango de aplicaciones de la madera de balsa, lo que les ha permitido ofrecer el surtido más extenso de materiales ligeros y materiales compuestos

al mercado. BALTEK® SB 100 es uno de los productos que produce la Empresa, fabricado a partir de la balsa secada al horno con una configuración end-grain, como se muestra en la Figura 8.

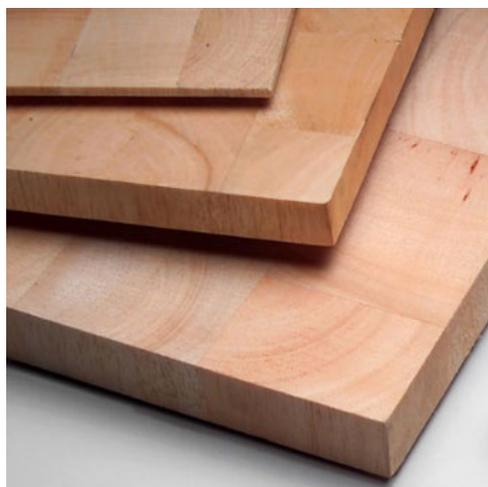


Figura 8 Paneles BALTEK® SB 100
Fuente: (Plantabal S.A., 2016)

El presente estudio propone la utilización del BALTEK® como núcleo del panel estructural tipo sándwich no solamente porque es un material ecológico y sustentable, sino debido a su alta resistencia a la humedad, aislación térmica y acústica; y principalmente este producto ha sido seleccionado por sus óptimas propiedades físico-mecánicas que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades mecánicas del BALTEK® SB 100

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL BALTEK® SB100						
ESPECIE	DENSIDAD NOMINAL APARENTE (Kg/m³)	ESFUERZO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR (Kg/m²)	MÓDULO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR (Kg/m²)	MÓDULO DE TRACCIÓN PERPENDICULAR (Kg/m²)	ESFUERZO DE CORTE (Kg/m²)	MÓDULO DE CORTE (Kg/m²)
Ochroma pyramidale	148,00	9,20	2526,00	5,70	2,60	187,00

Fuente: Modificado de PLANTABAL S.A. (2016).

Al proponer un panel estructural con los biomateriales mencionados como alternativa de mampostería convencional, además de obtener un producto amigable con el medio ambiente, cuyo comportamiento sea óptimo ante cargas estáticas y sísmicas, se pretende aumentar la demanda nacional de madera estructural, la cual influirá en el desarrollo del país.

2.3. Hipótesis

Los tableros estructurales compuestos tipo sándwich elaborados en base a los biomateriales bambú (*Dendrocalamus asper*) y balsa (*Ochroma pyramidale*), tienen un comportamiento mecánico-estructural óptimo para ser utilizado en construcciones no-convencionales ubicadas en áreas de alta peligrosidad sísmica del Ecuador; y, además, coadyuvan en la disminución de la huella de CO₂ al medio ambiente.

2.4. Variables de la investigación

2.4.1. Variables independientes

Materiales: bambú (*Dendrocalamus asper*) y balsa (*Ochroma pyramidale*)

2.4.2. Variables dependientes

Comportamiento mecánico-estructural de los tableros estructurales tipo sándwich.

2.5. Cuadro de operacionalización de variables

Tabla 4

Cuadro de operacionalización de variables

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	MEDIDOR
Materiales: Bambú y balsa	Cantidad del material	Espesor del panel	Espesor total del tablero
		Número de capas	
Comportamiento mecánico-estructural	Propiedades físicas	Densidad	Masa por metro cúbico de material a un determinado contenido de humedad
		Contenido de humedad	
	Propiedades mecánicas	Compresión	MOE y MOR
		Flexión	Esfuerzo de flexión
		Tracción	MOE y MOR
	Corte	Esfuerzo de corte y módulo de corte	

2.6. Normativa relacionada

El Ecuador no tiene una normativa establecida para la caracterización físico-mecánica de paneles estructurales tipo sándwich, por lo que el proyecto se basa en la normativa American Society for Testig and Materials (ASTM) para los ensayos de densidad, compresión, tracción, flexión y corte; los cuales se describen a continuación:

- **ASTM C364 Resistencia a la compresión de construcciones tipo sándwich**

Este método de prueba cubre las propiedades de compresión de tableros estructurales tipo sándwich en una dirección paralela al plano de las caras. Las formas permitidas de material básico incluyen aquellos con superficies de unión continua (como la madera de balsa y espumas), así como aquellos con superficies de uniones discontinuas (como las estructuras tipo panal de abejas).

- **ASTM C271 Densidad de materiales de núcleo de sándwich**

Este ensayo cubre la determinación de la densidad del material del núcleo del sándwich. Las formas del material permitidas son aquellas superficies de unión continua (como la madera de balsa y las espumas), así como aquellas superficies de unión discontinua (como las estructuras tipo panal de abejas).

La densidad es una propiedad física fundamental que se puede usar junto con otras propiedades para caracterizar un núcleo tipo sándwich. La mayoría de las propiedades estructurales del núcleo tipo sándwich, como la resistencia y la rigidez, son proporcionales a la densidad. La obtención de datos de densidad del núcleo de sándwich puede ser esencial para las propiedades de diseño, las especificaciones de materiales, las aplicaciones de investigación y desarrollo y la garantía de calidad.

- **ASTM C393 Prueba de propiedades de cizallamiento del núcleo de construcciones de sándwich por flexión del haz**

Las construcciones usando estructuras tipo sándwich se utilizan cada vez más como componentes de alta resistencia y peso liviano y, por lo tanto, se están desarrollando y utilizando métodos de prueba estándar para determinar las propiedades críticas y las evaluaciones de resistencia.

El ensayo ASTM C393 cubre los procedimientos de prueba para determinar muchas de estas propiedades en una configuración de flexión plana. La prueba consiste en la flexión de tres o cuatro puntos de las muestras con mediciones de carga y deflexión. Se pueden determinar muchas propiedades diferentes a partir de un único conjunto de pruebas, como la rigidez a la flexión en sándwich, la resistencia al corte del núcleo y el módulo de corte, y la resistencia al revestimiento. Las pruebas para evaluar las resistencias al cizallamiento del núcleo también se pueden usar para determinar la resistencia de la unión núcleo a cara.

- **ASTM C273 Pruebas de propiedades de corte de materiales de núcleo sándwich**

El ensayo ASTM C273 determina las propiedades de corte de los materiales de núcleo de construcción de sándwich asociados con la distorsión de cizallamiento de planos paralelos a los revestimientos. Estas propiedades incluyen la resistencia al corte paralelo al plano del sándwich, y el módulo de corte asociado con las deformaciones en un plano perpendicular a los revestimientos. Esto se hace fijando un sándwich o muestra de núcleo a las placas de carga y realizando la prueba de tensión o compresión a esa muestra.

- **ASTM C297 Resistencia a la tracción plana de construcciones de sándwich**

Este ensayo determina la resistencia a la tracción plana del núcleo, la unión entre el núcleo y la cara o el revestimiento en un panel sándwich ensamblado. Los materiales de núcleo permitidos incluyen aquellos con una superficie de unión continua (madera de balsa y espumas), así como aquellos con una superficie de unión discontinua (estructura tipo nido de abeja).

2.7. Metodología de desarrollo del proyecto

De acuerdo a la matriz de diseño de investigación, presentada en la Tabla 5, el método de aproximación biomimética de investigación es el top-down (Knippers & Speck, 2012), dentro del cual el primer paso de la investigación consiste en el estudio teórico y generalidades del proyecto, utilizando el método deductivo, perteneciente a la categoría cualitativa, con una metodología documental y técnica basada en la lectura y análisis de artículos científicos y libros; el segundo paso consiste en la elaboración de prototipos, en el cual se aplicará el método didáctico de categoría mixta, cuya metodología es evaluativa, la técnica a utilizar es el control de calidad de acuerdo a la normativa y la estrategia a seguir es una pasantía en la empresa PLANTABAL S.A. Una vez elaborados los prototipos, el siguiente paso es la caracterización físico-mecánica, a través del método analítico de la categoría cuantitativa y metodología experimental, cuya técnica consiste en pruebas de laboratorio, con la utilización de instrumentación de laboratorio y probetas de ensayo. El cuarto paso de la investigación es el modelamiento y análisis computacional aplicando el método sintético de categoría cuantitativa, con metodología evaluativa, basándose en las técnicas de matemáticas, programación y evaluación de análisis por elementos finitos mediante el programa Matlab y LS-DYNA. El último paso es el análisis y comparación de resultados, utilizando el método comparativo de la categoría cuantitativa y metodología analítica, cuya técnica es la estadística avanzada y la estrategia es a través de matrices y gráficas de tendencia estadística (Creswell, 1994).

Tabla 5*Matriz de diseño de la investigación a desarrollar en el presente estudio*

Aproximación de la investigación	Pasos de la investigación	Método	Categoría	Metodología	Técnica	Estrategia
Aproximación biomimética Top-down	Generalidades y marco teórico	Deductivo	Cualitativa	Documental	Lectura y análisis de documentos	Artículos científicos libros
	Prototipos	Didáctico	Mixta	Evaluación	Control de calidad de acuerdo a la normativa	Pasantía en Plantabal S.A
	Propiedades físico-mecánicas	Analítico	Cuantitativa	Experimental	Pruebas de laboratorio	Instrumentación de laboratorio. Probetas de ensayo
	Modelamiento y análisis computacional	Sintético	Cuantitativa	Evaluación	Matemáticas, programación y análisis. Modelación de elementos (FEM) y análisis por elementos finitos (FEA)	Matlab LS-DYNA
	Análisis y comparación de resultados	Comparativo	Cuantitativa	Analítica	Estadística avanzada	Matrices Gráficas de tendencia estadística

CAPÍTULO III

ELABORACIÓN DE PROTOTIPOS

3.1. Estudio de factibilidad de la balsa y bambú para elaboración de panel de núcleo y paneles externos bidireccionales

Según Usman Aminu, M.F.Khamidi, and Hassan (2012), los materiales son componentes esenciales para la construcción, sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como un diseño apropiado, son responsables de la resistencia mecánica de la edificación. Por lo que el diseño de construcciones ecológicas debe empezar con la selección y el uso de materiales amigables con el medio ambiente, con características similares o mejores que los materiales de construcción tradicionales.

Los materiales de construcción son usualmente seleccionados por requisitos funcionales, técnicos y financieros. El precio ha sido la consideración principal al comparar los materiales seleccionados para un mismo propósito, sin embargo, el precio de un elemento de construcción significa solo costos de fabricación y transporte, más no los costos sociales o ambientales y con la sostenibilidad como tema crucial en las últimas décadas el sector de la construcción, causante directo o indirecto de una parte considerable del deterioro ambiental anual, tiene la obligación de contribuir al desarrollo sostenible al encontrar métodos de construcción más benignos para el medio ambiente (Usman Aminu et al., 2012).

Un análisis “desde la cuna a la tumba” de los productos de construcción provee una mejor comprensión de los costos a largo plazo de los materiales; estos costos son pagados no solo por el cliente, sino también por el propietario, los ocupantes y el medio ambiente (Kim & Rigdon, 1998). Consecuentemente el ciclo de vida de un material puede organizarse en tres fases: pre-construcción, construcción y post construcción, la evaluación del impacto ambiental en cada una de estas etapas, permite realizar un análisis costo-beneficio durante el periodo de vida de una edificación en lugar de una simple contabilidad de costos iniciales de construcción.

En la presente sección se realizará un análisis del bambú y la balsa como materiales de construcción basándose en las tres fases del ciclo de vida de los materiales indicadas anteriormente; durante la fase de pre-construcción se hablará de la disponibilidad del material, localización y fabricación, mientras que en la fase de construcción se realiza una comparación entre construcción con los materiales mencionados y construcción con los materiales convencionales, principalmente el hormigón y durante la última fase se enfocará en su capacidad de reciclaje y reutilización.

3.1.1. Bambú (*Dendrocalamus asper*)

3.1.1.1. Fase de Pre-construcción

El bambú tiene varias características a lo largo de su ciclo de vida que otorgan muchos beneficios al medio ambiente, capta de 50 a 100% más CO₂ y produce 35% más oxígeno que otras especies maderables, la morfología de sus rizomas ayuda en la conservación y estabilización del suelo y sus periodos rápidos de crecimiento facilitan la posibilidad de aprovechamiento, ya que llega a su etapa de maduración a la edad de 4 a 5 años, haciéndolo ideal para ser utilizado como material de construcción (Galvez, 2017).

El proceso de manufactura del bambú implica la entrada de materia prima, mano de obra, herramientas, insumos y energía eléctrica a fin de elaborar materiales como: latillas, tableros, tablas y tablones. Los resultados adicionales de este proceso son trozos de bambú y aserrín, además de desechos orgánicos e inorgánicos no peligrosos para el medio ambiente.

La Figura 9 representa los impactos ambientales del proceso de industrialización del bambú donde se identifica que el proceso causa impactos negativos en el agua y suelo en un rango no significativo. Adicionalmente, la repercusión en la calidad del aire (polvo) es medianamente significativa y el mayor impacto negativo es la contaminación por ruido. Por otro lado, el impacto positivo se evidencia en las actividades comerciales y empleo.

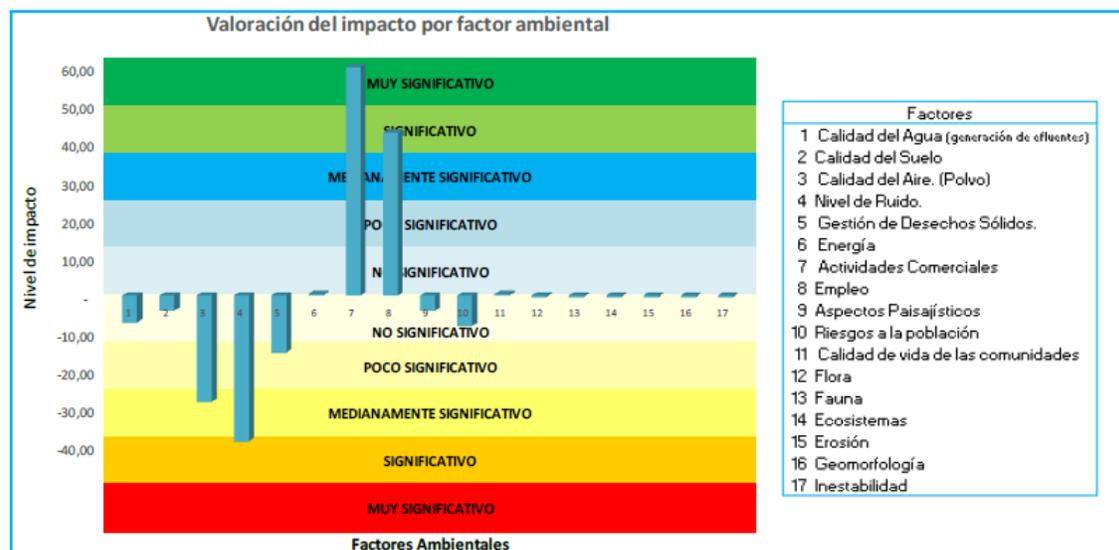


Figura 9 Representación gráfica de los impactos ambientales resultantes del proceso de fabricación del bambú
Fuente: (Macías, 2017)

De acuerdo a Añazco and Rojas (2015), en su estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la *Guadua angustifolia*, se estima que la superficie del territorio ecuatoriano cubierta por bambú es de 30.000 has, de las cuales 34% corresponde a *Guadua angustifolia*, 16% a *Dendrocalamus asper* y el 50% restante incluye varias especies que pertenecen a los géneros *Chusquea*, *Neurelepis* y *Generium*. Siendo las principales zonas donde se encuentra bambú *Dendrocalamus asper* las provincias del Guayas, Santa Elena, Los Ríos, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas, Pichincha y Napo.

Utilizando el bambú como material de construcción para zonas de alto riesgo sísmico, mayormente ubicadas en la región costa del país, se reduce la contaminación del aire producida por los vehículos encargados de transportar el material ya que este producto es de producción local como se puede ver en la Figura 10.

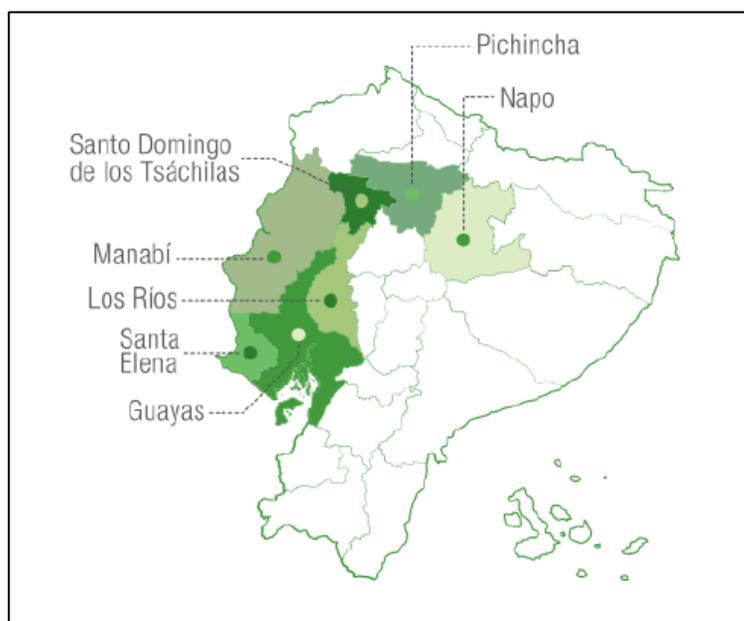


Figura 10 Mayor presencia del bambú en las provincias del Ecuador

Fuente: (Larco (2017))

3.1.1.2. Fase de Construcción

Nuevas formas de construcción utilizando productos industrializados de bambú como elementos estructurales proponen la utilización de elementos laminados, el uso de estos elementos permite mejorar los niveles de industrialización y de estandarización de los materiales de construcción a base de bambú, haciendo así sus propiedades más confiables y su adopción más simple en términos de diseño y construcción. Por añadidura, el uso de estos elementos en los sistemas constructivos, en vez de culmos, reduce significativamente la huella de carbono. Los laminados son capaces de secuestrar 12,85 kg de CO₂ por kg de producto, mientras que el bambú en culmos secuestra 5,69 kg de CO₂ por kg de producto, las dos estimaciones se refieren a kilogramos equivalentes de CO₂ en la plantación (Zea Escamilla et al., 2018).

Cabe recalcar que en una construcción hecha principalmente con bambú se seguirá utilizando el hormigón, la idea no es cambiar totalmente el hormigón y el acero por bambú, pero si tomar ventaja de este material para crear edificaciones que tengan menor impacto ambiental, en

el caso de las cimentaciones, al ser el bambú un material más ligero, el tamaño de éstas se reduciría, por lo tanto, menor cantidad de hormigón es requerido. Los resultados del estudio realizado por Acevedo (2014), sobre la comparación entre la evaluación del ciclo de vida de una casa de bambú con una de hormigón, muestran que el sistema estructural de una casa de bambú genera solo el 36% del CO₂ equivalente al producido por una casa de hormigón y consume alrededor del 47% de la energía incorporada. Dentro de ese 36% el hormigón utilizado en la casa de bambú contribuye con alrededor del 44% del total de CO₂ equivalente al producido por la casa entera, mientras que los componentes de bambú producen el 18% y la transportación de los componentes desde el lugar de manufactura al sitio de construcción aporta con el 33%.

3.1.1.3. Fase de Post-construcción

El CO₂ tomado del aire en la plantación del bambú es después liberado a la atmósfera al final de su ciclo de vida, lo que hace que el CO₂ sea reciclado provocando que su efecto en el calentamiento global sea cero, como se puede ver en la Figura 11. Si el bambú es quemado al final de su ciclo de vida en una planta de energía eléctrica, producirá energía con una huella de carbono negativa y con costo ecológico negativo. Esta energía puede reemplazar fácilmente la electricidad proveniente de otros recursos incluyendo combustibles fósiles, en otras palabras, el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ es consecuentemente evitada, resultando en una reducción de los potenciales efectos del calentamiento global (Vogtlander & Van der Lugt, 2014).

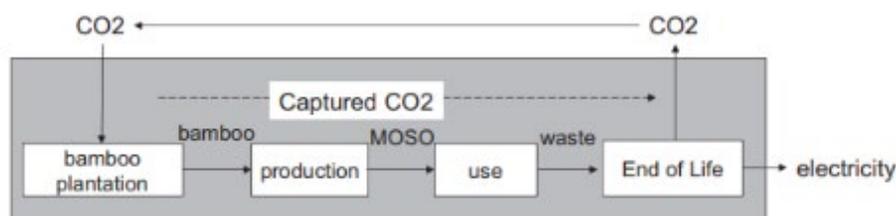


Figura 11 Ciclo de producción de CO₂ del bambú
Fuente: (Vogtlander and Van der Lugt (2014))

3.1.2. Balsa (*Ochroma pyramidale*)

3.1.2.1. Fase de Pre-construcción

La balsa es apreciada por estar disponible a una edad temprana, teniendo su mejor rendimiento y mejor calidad de producto cuando el árbol tiene de 4 a 6 años de edad, las cualidades ecológicas de este árbol favorecen la conservación del medio ambiente pues tiene la capacidad de restaurar el suelo y controlar su erosión (Osorio, Molina, Navarrete, Fonseca, & Ochoa, 2010).

La balsa es un árbol endémico del Ecuador, el país es el productor de más del 90% del consumo mundial, siendo las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, El Oro, Los Ríos y Pichincha las principales provincias en las cuales se produce, como se puede ver en la Figura 12. El área de producción de la balsa está en las zonas de alto riesgo sísmico, por lo que durante el proceso de transporte de materiales será menos la contaminación liberada al aire.

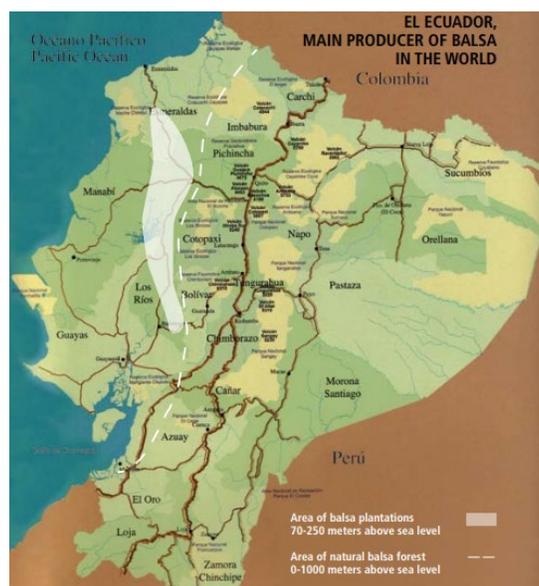


Figura 12 Distribución de las plantaciones de balsa en el Ecuador

Fuente: (Bonet, Coello, and Andrade (2009)

El proceso de transformación de la madera de balsa en paneles de núcleo BALTEK®, se desarrolló para crear un elemento fuerte, sólido y ligero, que permita una fabricación más duradera, sostenible y energéticamente eficiente. Las certificaciones ABS y FSC de este producto garantizan su impacto positivo en los aspectos ambiental, social y económico.

3.1.2.2. Fase de Construcción

La balsa, como otras maderas, es un material de construcción importante; fácil de procesar y reparar, y es ampliamente disponible para el sector de la construcción. Además, la madera es un material neutral de CO₂ si es producida mediante un proceso sustentable. Partiendo de que la producción de madera también requiere relativamente poca energía para su silvicultura y transformación, puede ser definida como “un material de construcción de baja energía” (Goverse, Hekkert, Groenewegen, Worrell, & Smits, 2001).

La sustitución de los materiales comúnmente utilizados en las prácticas de construcción con madera, de acuerdo al estudio realizado por Goverse et al. (2001), puede reducir significativamente las emisiones de CO₂. Cuando solo algunas partes de la edificación son reemplazadas por madera, se obtiene una reducción de aproximadamente el 38% de emisiones de CO₂ y si se considera pórticos de madera, una reducción de casi el 50% en emisiones es técnicamente factible.

3.1.2.3. Fase de Post-construcción

Los productos a base de madera tienen la ventaja de poder reusar y recuperar su energía; en el caso de reusar el material hay muchas formas de hacerlo, por ejemplo, reusar una vieja viga para producción de paneles de piso o reutilizar el marco de madera de una ventana para la producción de paneles. Las diferentes maneras de reciclar varían fuertemente en la capacidad estructural que se le pueda dar en futuras aplicaciones. Para hacer un uso práctico de un recurso, la forma más óptima es aplicar la metodología de cascada, utilizando tantas aplicaciones secuenciales como sea posible al minimizar la pérdida de calidad del recurso en su ciclo de vida desde la función para la

cual fue creado hasta su incineración, como se puede ver en la Figura 13, con este tipo de prácticas la vida total de una madera puede alargarse de 75 a 150 años (Fraanje, 1998).

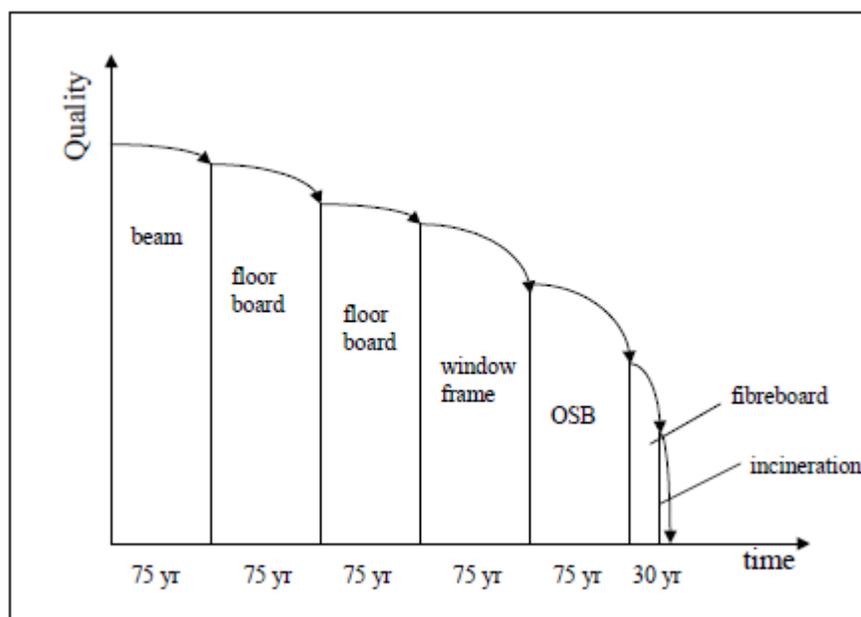


Figura 13 Cascada potencial de productos de madera

Fuente: (Fraanje (1998))

3.2. Estudio de factibilidad de ligantes

Los productos elaborados a base de madera incluyen aditivos, estos son los que brindan protección a la madera en contra de cualquier degradación biológica o contra el fuego, revestimiento como protección o dan a la madera una apariencia estética más favorable. La industria global de la madera es la que mayor uso da a los adhesivos: alrededor del 80% de todas las maderas y productos en base a madera implican algún tipo de ligante y el 70% del total del volumen de adhesivos producidos es consumido por la industria maderera. Los adhesivos utilizados en EWPs y en compuestos híbridos como tableros tipo sándwich que son utilizados con propósitos estructurales deben tener características de buena transmisión de cargas y durabilidad bajo cargas de largo y corto plazo (Sandberg, 2016).

Durante el proceso de fabricación de los tableros tipo sándwich se utilizaron tres tipos de ligantes: (i) Resina vinil acrílica, (ii) Acetato polivinílico y (iii) poliuretano líquido, cuyos beneficios y características se describen a continuación:

i. Resina vinil acrílica

Las resinas acrílicas por ser adhesivos reactivos, reticulados de alta resistencia estructural, proporcionan al material flexibilidad, protección de la superficie y durabilidad (Damico, 2003). Esta resina fue utilizada en la fabricación de los paneles externos de bambú.

ii. Acetato polivinílico

También conocido como goma blanca es un adhesivo para encolar madera, paneles de fibra, aglomerados y laminados de madera, este producto produce una unión inicial fuerte que desarrolla resistencia rápidamente (Geddes, 2003). Este ligante fue utilizado en la fabricación de los paneles de núcleo de balsa.

iii. Poliuretano líquido

Se utilizó el poliuretano de dos componentes para proporcionar la unión entre los paneles externos y los paneles de núcleo, este ligante fue seleccionado debido a que es conocido por su excelente adhesión, flexibilidad, comportamiento en bajas temperaturas, alta fuerza cohesiva y velocidades de curado que se adaptan fácilmente a las demandas del fabricante (Lay & Cranley, 2003).

3.3. Adquisición de materiales

3.3.1. Bambú (*Dendrocalamus asper*)

El proceso de selección, corte y transporte de los culmos utilizados para la elaboración de los paneles bidireccionales de bambú se lo realizó de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma NEC-SE-GUADÚA (2016), ya que esta norma se aplica para *Guadua angustifolia Kunth* y otros bambúes de similares características físico – mecánicas, como es el *Dendrocalamus asper*.

3.3.1.1. Selección

La selección de los culmos idóneos para la construcción de paneles se basó principalmente en aquellos que son maduros, es decir, que tengan una edad por encima de los tres años, siendo fácil su identificación por la visualización de puntos y manchas a lo largo del culmo, así como una coloración verde oscura diferente de los culmos jóvenes que tienen un mayor brillo y se encuentran envueltos en hojas en el tallo, como se puede observar en la Figura 14.

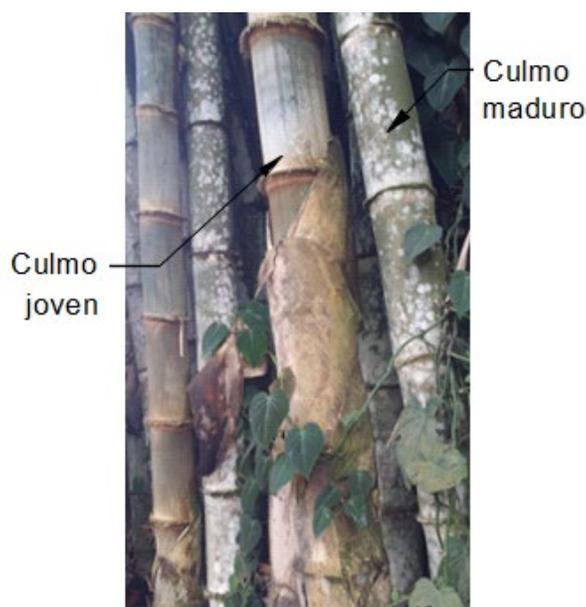


Figura 14 Identificación de culmos maduros y jóvenes

3.3.1.2. Corte

Los culmos maduros seleccionados fueron cortados con sierra eléctrica al ras del primer nudo inferior (ver Figura 15), para evitar la acumulación de agua y prevenir el deterioro del sistema radicular de la planta. Después del corte se procedió al tumbado del culmo con la ayuda de cuerdas, para evitar que en su caída se reviente o fisure.

Adicionalmente, se realizó el corte de ramas desde el ángulo inferior que forma cada rama con el culmo hacia la parte superior, evitándose así el desgarramiento de las fibras del culmo.



Figura 15 Corte de culmo de bambú con sierra eléctrica

3.3.1.3. Transporte

El transporte del material se lo realizó con los cuidados necesarios para impedir daños importantes en su estructura, es decir, evitar todo tipo de impacto durante el embarque, movilización y desembarque. También se evitó sobrecargar los culmos durante el transporte y almacenamiento, apilándolos en rumas de hasta 2,0 m de altura, procurándose que los culmos de mayor diámetro se coloquen en la parte inferior.

3.3.2. Balsa (*Ochroma pyramidale*)

El proceso de selección, corte y transporte de los troncos utilizados para elaboración de los paneles end-grain se lo realizó de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma NEC-SEMD (2014).

3.3.2.1. Selección

Se identifican los árboles de balsa que estén maduros, es decir, que tengan entre 4 y 5 años de edad, estos se los reconoce porque llegan a tener un diámetro de entre 30 y 115 cm y una altura entre 20 y 30 m.

3.3.2.2. Corte

El tipo de cosecha en este tipo de madera puede ser por cosecha tradicional o mecanizada con sierra eléctrica. Los troncos se cortan en listones rectangulares, siendo el corte largo en la dirección de las fibras, como se puede observar en la Figura 16.



Figura 16 Corte de árboles de balsa

Fuente: (Bonet et al. (2009)

3.3.2.3. Transporte

Los listones son apilados y colocados en camiones para su transporte siempre evitando que sufran daños durante el embarque, movilización y desembarque.

3.4. Elaboración de paneles externos bidireccionales de bambú

Los rollos de bambú *Dendrocalamus asper* adquiridos de acuerdo a la sección 3.4.1 deben ser sometidos a un proceso de industrialización para convertirse en tableros laminados, este proceso se resume en el diagrama de flujo de la Figura 17 y se describe a continuación:

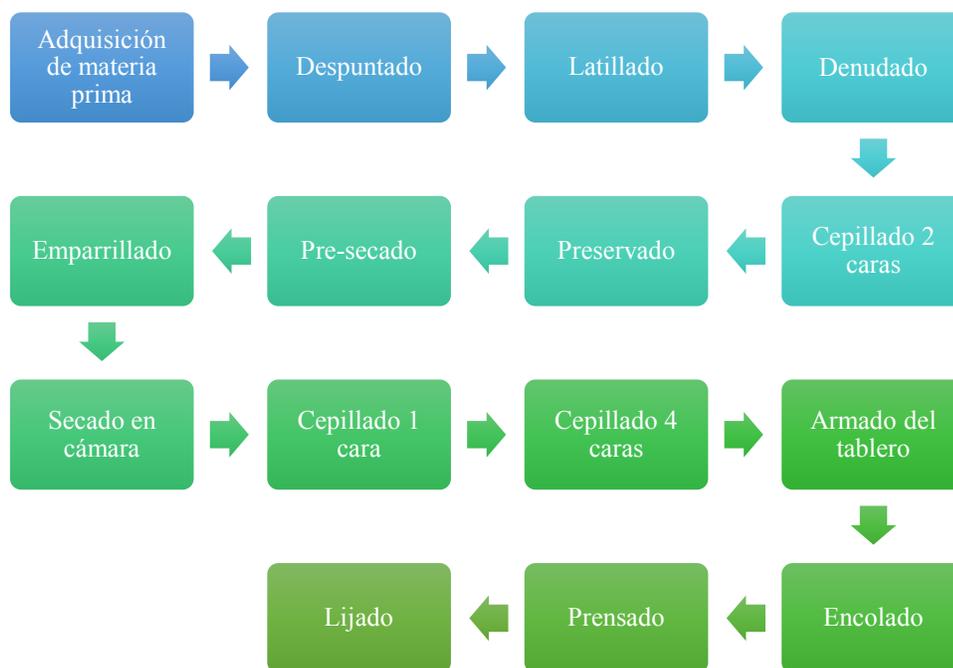


Figura 17 Diagrama de flujo del proceso de industrialización del bambú para convertirlo en laminados

Fuente: (Macías, 2017)

Despuntado. - Se uniformiza la longitud de los rollos de bambú a 2,5 m, despuntando ambos lados del rollo.



Figura 18 Despuntado de bambú rollizo

Fuente: (Macías, 2017)

Latillado. - El bambú rollizo se coloca en una máquina latilladora con el objetivo de realizar varios cortes longitudinales y separar el bambú en latillas.



Figura 19 Latillado de bambú rollizo
Fuente: (Macías, 2017)

Denudado. - Se procede a quitar el nudo interno de las latillas y la corteza externa de las mismas.



Figura 20 Denudado de latillas de bambú
Fuente: (Macías, 2017)

Cepillado en 2 caras. - Se colocan las latillas en una máquina cepilladora retirando la epidermis de la parte externa y los nudos en la parte interna.



Figura 21 Cepillado de latillas en 2 caras
Fuente: (Macías, 2017)

Preservado. - Se preserva las latillas sumergiéndolas por un periodo de 24 horas en un preservante con una concentración del 5% de bórax y ácido bórico por cada 100 litros de agua.



Figura 22 Preservado de latillas de bambú
Fuente: (Macías, 2017)

Pre-secado. - Las latillas permanecen en temperatura ambiente por un periodo de 5 a 8 días.



Figura 23 Presecado de latillas

Fuente: (Macías, 2017)

Emparrillado. - Las latillas se colocan en coches con parrillas para facilitar su acceso al horno de secado.



Figura 24 Emparrillado de latillas

Fuente: (Macías, 2017)

Secado en cámara. - Los coches cargados de latillas entran a la cámara de secado con una capacidad de 10.000 a 12.000 latillas a una temperatura de 60°C, en el interior de la cual el aire caliente circula por medio de hélices conectadas a motores eléctricos. Las latillas al final del proceso de secado tienen un contenido de humedad del 10 %.



Figura 25 Horno de secado de latillas
Fuente: (Macías, 2017)

Cepillado de 1 cara. - Las latillas secas se vuelven a cepillar para eliminar cualquier imperfección.



Figura 26 Cepillado de una cara
Fuente: (Macías, 2017)

Cepillado de 4 caras. - Las latillas se cepillan en forma horizontal y vertical, quedando listas para la conformación de laminados.



Figura 27 Cepillado final en 4 caras
Fuente: (Macías, 2017)

Armado del tablero y encolado. - Manualmente se unen las latillas en forma horizontal dependiendo del ancho y forma que se desee dar al tablero. Se aplica resina vinil acrílica con un rodillo de felpa para pegar las latillas.



Figura 28 Armado y encolado de laminados
Fuente: (Macías, 2017)

Prensado. - Las latillas pasan a una prensa que permite hacer tableros de 2,40 m x 60 cm, realizando una presión horizontal y vertical de 80 y 20 Psi respectivamente, fijando el pegante a una temperatura de 60°C.



Figura 29 Prensado de laminados
Fuente: (Macías, 2017)

Lijado. - Como paso final los tableros se lijan por los dos lados para tener el producto terminado.



Figura 30 Lijado de laminados de bambú
Fuente: (Macías, 2017)

3.5. Elaboración de núcleo de balsa

Los listones de balsa *Ochroma Pyramidale* adquiridos de acuerdo a la sección 3.4.2 deben ser sometidos a un proceso de industrialización para convertirse en paneles end-grain, este proceso se resume en el diagrama de flujo de la Figura 31 y se describe a continuación:



Figura 31 Diagrama de flujo del proceso de industrialización de la balsa para convertirlo en panel end-grain

Secado. – Los listones de balsa cortados en campo llegan a la planta de secado en el lapso de 10 días. Las secadoras son programadas para tener un ciclo de secado de 10 días a 50°C para espesores mayores a 3 pulgadas y de 5 días para los espesores menores a 1 pulgada. La humedad promedio de los listones al finalizar el proceso de secado es del 30%.



Figura 32 Listones de balsa en horno de secado
Fuente: (Bonet et al. (2009))

Liberación de espesores. – Los listones secos de diferentes espesores pasan a ser mezclados.

Cepillado. – El cepillo se calibra de acuerdo al espesor y limpia los 4 lados de los listones.

Clasificado. – Los listones pasan a una banda de clasificación para ser agrupados de acuerdo a la dimensión del largo.



Figura 33 Clasificación de listones de balsa
Fuente: (Bonet et al. (2009))

Armado de plantilla. – Se arman plantillas de bloques con los grupos anteriormente clasificados y se le da un ancho y alto específico a cada plantilla.



Figura 34 Bloques de listones de balsa
Fuente: (Bonet et al. (2009))

Encolado. – Las plantillas armadas pasan a hacer pegadas con acetato polivinílico, se deja reposar 30 minutos y posteriormente pasan al área de prensado.

Prensado. – Las plantillas encoladas pasan a prensas hidráulicas por 90 minutos a una presión de 1200 y 1500 PSI.

Codificación. – Se clasifican los bloques de acuerdo a su densidad y se les asigna un código.

Almacenaje. – Los bloques pasan un día en almacenamiento.

Corte y dimensionamiento. – Los bloques pasan al área de cortado, los espesores varían entre 3 pulgadas a 1 pulgada.

Lijado. – finalmente se lijan los paneles como última etapa.



Figura 35 Producto final, panel de núcleo de balsa
Fuente: (Plantabal S.A. (2016))

3.6. Ensamblaje de tableros estructurales tipo sándwich

Con los paneles externos de bambú y el panel de núcleo previamente fabricados como se indica en las secciones anteriores, se procede a adherir cada una de las capas con la ayuda del poliuretano líquido utilizando una encoladora eléctrica que distribuye 170 gramos por metro cuadrado.

Inmediatamente después de colocar el poliuretano entre cada panel, el tablero pasa a una prensa monoplato la cual aplica una presión de 170 Psi, durante 30 minutos. La **Figura 36** muestra el proceso de ensamblaje de los tableros tipo sándwich:

a)



b)



Figura 36 Proceso de ensamblaje de tableros a) encolado de poliuretano en paneles y b) prensado de tableros

CAPÍTULO IV

PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SÁNDWICH

4.1. Introducción

Las propiedades de los compuestos de madera dependen de una variedad de factores, incluyendo la especie de madera, los regímenes de manejo forestal, el tipo de adhesivo utilizado para unir los elementos de madera, la geometría de los elementos (fibras, hebras, partículas, chapas, entre otros), y la densidad del producto final (Cai & Ross, 2010).

Las propiedades mecánicas se utilizan para caracterizar los rendimientos de las estructuras compuestas como son las estructuras tipo sándwich. Las propiedades elásticas y de resistencia son los criterios principales para seleccionar materiales, establecer un diseño o especificaciones de un producto. Las propiedades elásticas incluyen el módulo de elasticidad (*MOE*) en tensión y compresión, mientras que las propiedades de resistencia incluyen generalmente módulo de ruptura (*MOR*), resistencia a la compresión paralela a las fibras, resistencia a la tensión perpendicular a la superficie, por mencionar algunos.

Estas propiedades son determinadas y analizadas en el presente capítulo, describiendo los procesos y métodos realizados en los ensayos de: (i) Densidad y contenido de humedad, (ii) Compresión paralela al plano de los paneles externos, (iii) Tracción perpendicular al plano de los paneles externos, (iv) Flexión perpendicular al plano de los paneles externos, y (v) Corte paralelo al plano de los paneles externos.

Para un mejor entendimiento de las propiedades mecánicas de los tableros estructurales tipo sándwich se han identificado tres ejes: el eje longitudinal que es paralelo a los paneles externos, cuya dirección es a lo largo de las fibras más extensas de bambú, el eje transversal es paralelo a las

fibras del núcleo de balsa y el radial es perpendicular a los dos ejes antes mencionados, estos ejes se encuentran identificados en la *Figura 37*.

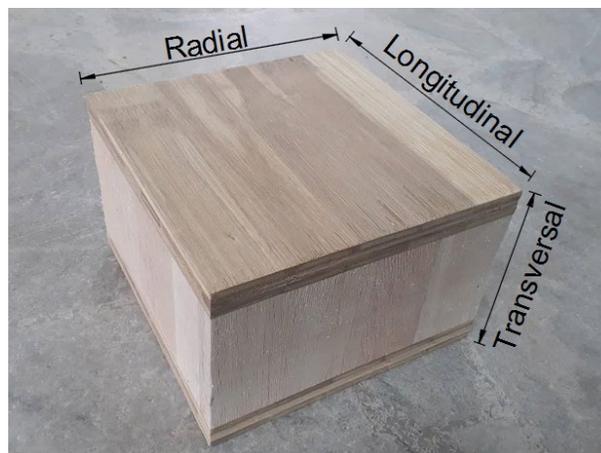


Figura 37 Ejes identificados en tableros estructurales tipo sándwich

Dentro de los resultados se presenta relaciones entre las propiedades mecánicas obtenidas con las propiedades físicas, como densidad y contenido de humedad. El análisis y comparación entre las propiedades físico-mecánicas de ambos prototipos se los incluye dentro de este capítulo en la sección de discusión.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Densidad seca y contenido de humedad

La densidad y el contenido de humedad son términos fundamentales para determinar muchas propiedades útiles de la madera y de los productos a base de madera. La densidad es una de las propiedades físicas más importantes, ésta se refiere a la relación que existe entre el peso y el volumen del espécimen a un determinado contenido de humedad. Así como la densidad, muchas propiedades físicas y mecánicas de la madera varían de acuerdo al contenido de humedad presente en las mismas (Cai & Ross, 2010).

Para la determinación de la densidad y del contenido de humedad del tablero estructural tipo sándwich se utilizó la norma ASTM C271 Standard Test Method for Density of Sandwich Core Materials y para los paneles de balsa y bambú que componen el tablero la norma ASTM D2395 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials.

4.2.1.1. Paneles de bambú y balsa

Para la determinación de la densidad de muestras de los paneles externos bidireccionales de bambú y panel de núcleo de balsa se utilizó un total de 30 muestras con un tamaño nominal de 50 mm x 50 mm x espesor del material como se indica en la *Figura 38*.



Figura 38 Dimensiones nominales de muestras de densidad de paneles a) balsa $e=89$ mm, b) balsa $e=44$ mm y c) bambú

4.2.1.1.1. Selección del material

Las 30 muestras utilizadas para el ensayo de densidad y contenido de humedad, tanto para el bambú como para la balsa, fueron cortadas de paneles cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del panel, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas, retirando las fibras sueltas antes de ser pesadas y medidas. Las Tabla 6 y Tabla 7 resumen las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.1.1.2

Tabla 6*Muestras seleccionadas para prueba de densidad y contenido de humedad en paneles*

MUESTRA	ESPEJOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPEJOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
DNE1-1	89,0	50,0	50,0	DNE2-1	44,0	51,0	51,0
DNE1-2	89,0	52,0	51,0	DNE2-2	44,0	50,0	51,0
DNE1-3	89,0	51,0	51,0	DNE2-3	44,0	51,0	50,0
DNE1-4	89,0	51,0	50,0	DNE2-4	44,0	50,0	51,0
DNE1-5	89,0	50,0	51,0	DNE2-5	44,0	50,0	51,0
DNE1-6	89,0	50,0	51,0	DNE2-6	44,0	51,0	51,0
DNE1-7	89,0	49,0	51,0	DNE2-7	44,0	51,0	51,0
DNE1-8	89,0	51,0	51,0	DNE2-8	44,0	51,0	51,0
DNE1-9	89,0	50,0	51,0	DNE2-9	44,0	50,0	51,0
DNE1-10	89,0	51,0	51,0	DNE2-10	44,0	50,0	51,0

Tabla 7*Muestras seleccionadas para prueba de densidad*

MUESTRA	ESPEJOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
DC1	17,0	50,0	51,0
DC2	15,0	51,0	51,0
DC3	17,0	51,0	52,0
DC4	15,0	51,0	51,0
DC5	15,0	51,0	50,0
DC6	17,0	51,0	51,0
DC7	17,0	51,0	51,0
DC8	17,0	51,0	51,0
DC9	15,0	51,0	51,0
DC10	17,0	51,0	51,0

4.2.1.1.2.Preparación del material

Identificación

Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código que consiste en 5 dígitos: el primero es para identificar el ensayo al que pertenece la muestra, para este caso es D por densidad; el segundo se refiere a la parte del tablero sándwich al que pertenece la muestra, en el

caso de la balsa tiene una N por núcleo y en el caso del bambú una C por ser de la cara del tablero; y el tercer, cuarto y quinto dígito corresponden a la numeración de la muestra E1-1 para el caso de la balsa de espesor 89 mm y E2-1 para el espesor de 44 mm. La **Figura 39** indica las muestras con su respectiva identificación.



Figura 39 Identificación de muestras de densidad de paneles de balsa y bambú

4.2.1.1.3. Configuración del ensayo

Para el desarrollo del ensayo fue necesario la utilización de un horno de secado para maderas cuya máxima temperatura es de 200°C, también un calibrador de 0.1 mm de precisión y una balanza electrónica de 0.01 g de sensibilidad.

El procedimiento seguido para la determinación de la densidad y contenido de humedad se lo realizó de acuerdo a la norma, dicho proceso se indica a continuación:

- Se determinó las dimensiones iniciales de cada muestra en longitud, ancho y espesor utilizando el calibrador, también se determinó el peso de las muestras.

- A continuación, se colocó las muestras en el horno manteniendo una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ y se pesó las muestras cada 24 horas hasta que el peso no tenga una variación de 0,2%, lo que se logró en 5 días.
- Finalmente, con el peso de las muestras estabilizado, se procedió a determinar las dimensiones de las muestras en longitud, ancho y espesor.

4.2.1.1.4.Cálculos

a) Contenido de humedad

El contenido de humedad expresado en términos de porcentaje de la masa se determina con la Ecuación 1:

$$M = \frac{m_M - m_O}{m_O} \times 100 \quad (1)$$

donde M es contenido de humedad del espécimen al tiempo de la prueba en porcentaje, m_M es la masa inicial en kg y m_O es la masa seca al horno en kg .

b) Densidad a un contenido de humedad específico

La densidad a un determinado contenido de humedad, se define como la relación entre la masa y el volumen de la muestra en un mismo contenido de humedad, como se expresa en la Ecuación 2:

$$\rho_M = \frac{m_M}{V_M} \quad (2)$$

donde ρ_M es la densidad al contenido de humedad M en kg/m^3 , m_M es la masa del espécimen a un valor de contenido de humedad M en kg y V_M volumen del espécimen a un valor de contenido de humedad M en m^3 .

4.2.1.2. Tableros tipo sándwich

La determinación de la densidad de los tableros como material compuesto se llevó a cabo con un total de 6 muestras con un tamaño nominal de 300 mm x 300 mm x el espesor del prototipo, como se indica en la **Figura 40**, las dimensiones cumplen con el tamaño mínimo especificado en la norma.

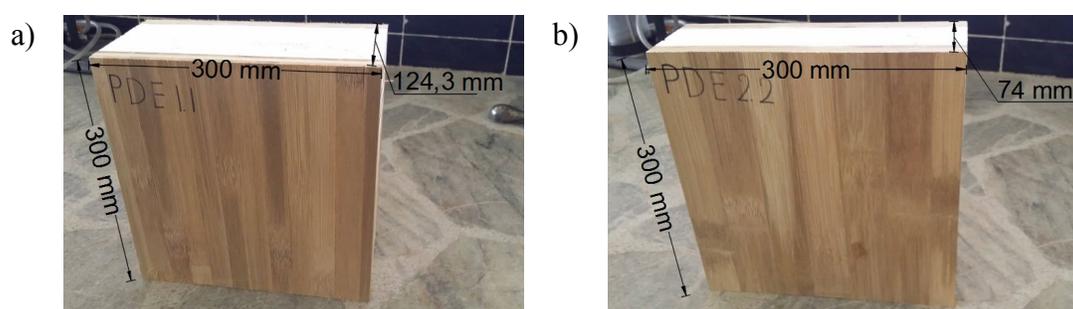


Figura 40 Dimensiones nominales de muestras de densidad de tableros tipo sándwich a) prototipo 1 y b) prototipo 2

4.2.1.2.1. Selección del material

Las 6 muestras utilizadas para el ensayo de densidad y contenido de humedad fueron cortadas de tableros grandes cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del prototipo, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas, retirando las fibras sueltas antes de pesar y medir. La Tabla 8 resume las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.1.2.2

Tabla 8*Muestras seleccionadas para prueba de densidad y contenido de humedad*

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	ESPELOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPELOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
PDE1-1	124,3	300,1	300,2	PDE2-1	74,0	300,0	300,2
PDE1-2	124,3	300,0	300,1	PDE2-2	74,0	300,2	300,2
PDE1-3	124,3	300,2	300,1	PDE2-3	74,0	300,0	300,1

4.2.1.2.2. Preparación del material

Identificación

Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código que consiste en 5 dígitos: el primer y segundo son para identificar el ensayo al que pertenece la muestra en el presente caso es PD por prueba de densidad, el tercer y cuarto se refieren al espesor de la muestra E1 para el prototipo 1 y E2 para el prototipo 2 y el quinto corresponde a la numeración de la muestra, como se puede identificar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

4.2.1.3. Configuración del ensayo

Para el desarrollo del ensayo fue necesario la utilización de un horno de secado para maderas cuya máxima temperatura es de 200°C, también un calibrador de 0.1 mm de precisión y una balanza electrónica de 0.01 g de sensibilidad.

El procedimiento seguido para la determinación de la densidad y contenido de humedad se lo realizó de acuerdo a la norma, el cual se indica a continuación:

- Se determinó las dimensiones iniciales de cada muestra en longitud, ancho y espesor utilizando el calibrador, también se determinó el peso de las muestras.

- A continuación, se colocó las muestras en el horno manteniendo una temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$, se pesó las muestras cada 24 horas hasta que el peso no tenga una variación de 0,2%, lo que se logró en 5 días.
- Finalmente, con el peso de las muestras estabilizado, se procedió a determinar las dimensiones de las muestras en longitud, ancho y espesor.

Para el cálculo de la densidad al contenido de humedad correspondiente se utilizó las fórmulas indicadas en la sección 4.2.1.1.4

4.2.2. Compresión

Mediante este ensayo se pretendió obtener el módulo de resistencia a compresión (MOR_L), deformaciones unitarias y el módulo de elasticidad (MOE_L) de los tableros estructurales tipo sándwich bajo cargas de compresión paralelas al plano de los paneles externos, es decir, en la dirección longitudinal. Estas propiedades son esenciales para el diseño del tablero, especificaciones del material, aplicaciones de investigación y desarrollo, y garantía de la calidad del mismo. El ensayo de compresión se lo realizó con los lineamientos de la normativa ASTM C364 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions.

Las muestras ensayadas bajo cargas de compresión consistieron en 10 especímenes, 5 para cada prototipo, cuyas dimensiones nominales son de 250 mm x 250 mm x 124.3 mm en el caso del prototipo 1 y 150 mm x 150 mm x 74 mm en el caso del prototipo 2, como se puede ver en la **Figura 41**. Las dimensiones se seleccionaron para que cumplan con los requisitos especificados en la norma.

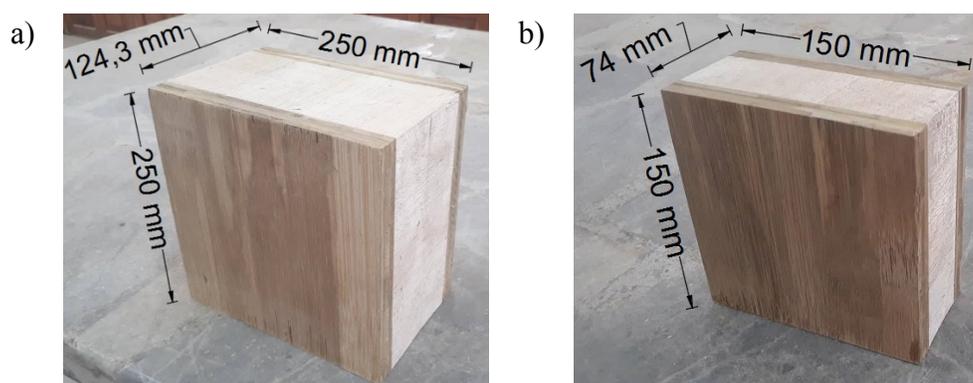


Figura 41 Dimensiones nominales de muestras de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

4.2.2.1. Selección del material

Las 10 muestras utilizadas para el ensayo de compresión, fueron cortadas de paneles grandes cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del prototipo, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas, retirando las fibras sueltas, y manteniendo la alineación de las fibras antes de pesar y medir. La Tabla 9 resume las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.2.2.

Tabla 9

Muestras seleccionadas para prueba de compresión

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	ESPEJOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPEJOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
PCE1-1	124,3	247,9	247,6	PCE2-1	74,0	149,0	150,6
PCE1-2	124,3	249,6	248,0	PCE2-2	74,0	149,0	149,2
PCE1-3	124,3	249,0	248,9	PCE2-3	74,0	149,3	149,4
PCE1-4	124,3	249,0	249,7	PCE2-4	74,0	148,4	149,3
PCE1-5	124,3	248,9	248,9	PCE2-5	74,0	247,6	249,0

Las dimensiones de las muestras fueron determinadas con un calibrador de 0.1 mm de precisión y también se obtuvo su masa mediante una balanza de 0.01 g de sensibilidad.

4.2.2.2. Preparación del material

a) Identificación

Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código que consiste en 5 dígitos: el primer y segundo son para identificar el ensayo al que pertenece la muestra en el presente caso es PC por prueba de compresión, el tercer y cuarto se refieren al espesor de la muestra E1 para el prototipo 1 y E2 para el prototipo2 y el quinto corresponde a la numeración de la muestra.

b) Galgas extensométricas

Para realizar la medición de las deformaciones unitarias se adhirió galgas extensométricas (strain gauges) en los paneles externos de las muestras siguiendo el procedimiento detallado a continuación: (i) lijado de la parte central de los paneles externos de las muestras, (ii) pegado de los strain gauges con resina epóxica de dos partes para maderas, (iii) soldadura de cable a los strain gauges y (iv) conexión de los cables al puente de medición de deformaciones.

4.2.2.3. Configuración del ensayo

Las muestras de compresión se realizaron en una máquina de compresión simple marca Controls con una capacidad de carga de 2000 kN, dicha máquina posee una rótula en la parte superior que permite generar contacto completo entre las placas de carga y las muestras. También se utilizó un puente de medición de deformaciones marca Omega de 120 ohmios, que decodifica las señales de deformación enviadas por la galga extensométrica en voltaje.

A continuación, se describe el procedimiento realizado en el ensayo:

- Con las muestras preparadas de acuerdo a lo indicado en la sección 4.2.2.2 se colocó las muestras en la máquina de compresión, centrando la muestra bajo las placas de carga, la

dirección de la carga debe ser paralela al plano de los paneles externos como se indica en la *Figura 42*.

- Se configuró la máquina para que la velocidad de aplicación de la carga sea de 0.5 mm/min, el tiempo de ensayo fue de 10 minutos por muestra.
- Los datos obtenidos en el ensayo fueron de fuerza y deformación unitaria.

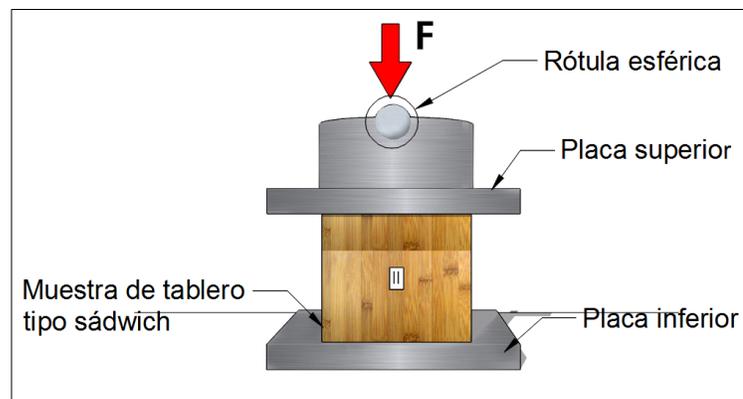


Figura 42 Configuración del ensayo de compresión

4.2.2.4. Cálculos

a) Módulo de Elasticidad (*MOE*)

El módulo de elasticidad o también conocido como el módulo de Young es una medida de la resistencia a la elongación o contracción de un material sometido a compresión o tracción. La elasticidad implica que las deformaciones producidas por esfuerzos pequeños por debajo del límite de proporcionalidad son completamente recuperables después de que la carga es removida. Cuando los esfuerzos superan el límite de proporcionalidad ocurre una deformación plástica o falla (Cai & Ross, 2010).

Típicamente la curva de esfuerzo-deformación de compuestos de madera es lineal por debajo del límite de proporcionalidad y la pendiente de esta curva es el módulo de elasticidad (*MOE*).

El esfuerzo de compresión aplicado en las muestras fue calculado con la Ecuación 3, de acuerdo a los lineamientos de la norma:

$$\sigma = \frac{P}{[w(2t_{fs})]} \quad (3)$$

Donde σ es el esfuerzo de compresión en *MPa*, P es la fuerza aplicada en N , w es el ancho del espécimen en *mm*, t_{fs} es el espesor de un solo panel externo en *mm*. La norma específica que los esfuerzos son expresados en términos de un área transversal nominal de los dos paneles externos del tablero, en lugar del espesor total del sándwich.

b) Módulo de Ruptura (*MOR*)

El módulo de ruptura refleja la capacidad máxima de carga de un miembro (Bahtiar, Nugroho, & Surjokusumo, 2010). Este módulo fue determinado con la Ecuación 4,

$$MOR = \frac{P_{max}}{[w(2t_{fs})]} \quad (4)$$

donde *MOR* es el módulo de ruptura en *MPa*, P_{max} es la fuerza máxima aplicada en N , w es el ancho del espécimen en *mm*, t_{fs} es el espesor de un solo panel externo en *mm*.

4.2.3. Tracción

El ensayo de tracción descrito por la norma ASTM C297 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions se utiliza para determinar el módulo de ruptura

resistido por el material y verificar la calidad del ligante entre paneles externos y núcleo. El uso de un ligante adecuado permite tener una estabilidad de la estructura y permitir la transferencia de cargas entre los paneles externos y el núcleo de la estructura tipo sándwich.

Las propiedades de tracción de los tableros estructurales se determinaron ensayando 10 muestras con un tamaño nominal de 50 mm x 50 mm x el espesor de cada prototipo, como se indica en la *Figura 43*.

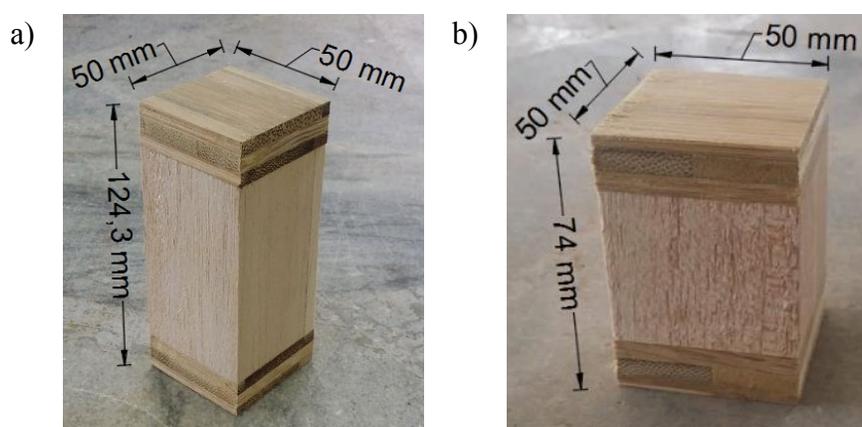


Figura 43 Dimensiones nominales de muestras de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2

4.2.3.1. Selección del material

Las 10 muestras utilizadas para el ensayo de tracción, fueron cortadas de paneles grandes cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del panel, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas, retirando las fibras sueltas, se descartó las muestras que presentaron muescas, socavaduras y superficies ásperas, irregulares o delaminaciones. La Tabla 10 resume las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.3.2.

Tabla 10*Muestras seleccionadas para prueba de tracción*

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	ESPELOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPELOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
PTE1-1	124,3	50,0	49,6	PTE2-1	74,0	50,0	49,0
PTE1-2	124,3	50,0	50,0	PTE2-2	74,0	50,1	50,0
PTE1-3	124,3	49,8	50,0	PTE2-3	74,0	49,0	50,2
PTE1-4	124,3	49,2	50,1	PTE2-4	74,0	50,0	49,7
PTE1-5	124,3	50,3	49,8	PTE2-5	74,0	50,0	49,8

4.2.3.2. Preparación de muestras

Identificación

Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código que consiste en 5 dígitos: el primer y segundo son para identificar el ensayo al que pertenece la muestra en el presente caso es PT por prueba de tracción, el tercer y cuarto se refieren al espesor de la muestra E1 para el prototipo 1 y E2 para el prototipo2 y el quinto corresponde a la numeración de la muestra.

4.2.3.3. Configuración del ensayo

El ensayo de tracción se lo realizo en una maquina universal de ensayos marca Shimadzu con una capacidad de carga de 50 KN. Adicionalmente, se utilizó bloques de carga de acero con una superficie igual a la de las muestras.

El ensayo se lo realizó con el procedimiento descrito a continuación:

- Las muestras preparadas de acuerdo a la sección 4.2.3.2 se las adhirió a los bloques de carga con un adhesivo adecuado, al no especificarse el tipo de adhesivo en la norma se realizó varias pruebas preliminares para encontrar el ligante que permita obtener los resultados esperados de falla en la unión de los paneles externos con el núcleo. Se determinó que la masilla plástica Mustang es la que proporciona una mejor adherencia entre los bloques de carga y las muestras.

- Los bloques de carga adheridos a las muestras se sujetaron en las mordazas de la máquina universal de ensayos, las mismas que aplicaron la fuerza de tracción perpendicular al plano de los paneles externos, como se puede ver en la *Figura 44*.
- Se configuró la máquina para que se aplique la carga a una velocidad de 1 mm/seg, el ensayo tuvo una duración de 10 minutos por muestra.
- Los datos obtenidos en este ensayo fueron de desplazamiento del cabezal de la máquina y la fuerza aplicada.

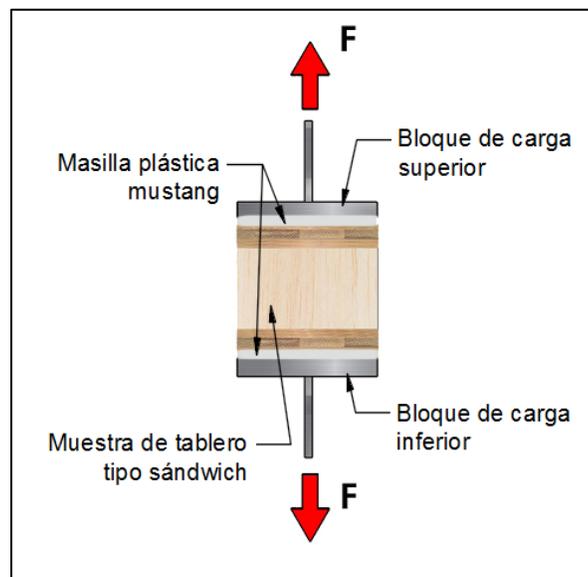


Figura 44 Configuración de ensayo de tracción

4.2.3.4. Cálculos

a) Módulo de ruptura de tracción

Se determinó el Módulo de ruptura de tracción con la Ecuación 5:

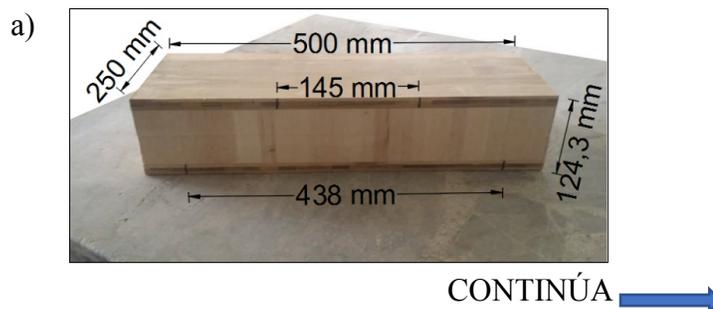
$$MOR_t = \frac{P_{max}}{A} \quad (5)$$

donde MOR_t es el Módulo de ruptura de tracción en MPa , P_{max} es la fuerza máxima antes de la falla del elemento en N y A es el área transversal de la muestra en mm^2 .

4.2.4. Flexión

El ensayo de flexión aplicado para las muestras de tablero tipo sándwich se lo realizó para determinar el módulo de resistencia al corte del núcleo, módulo de corte y para evaluar la unión entre los paneles externos y el núcleo, datos necesarios para realizar diseños estructurales, especificaciones del material, aplicaciones de investigación y desarrollo y como prueba de control de calidad para tableros tipo sándwich. El ensayo se lo realizó siguiendo la norma ASTM C393 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.

Para determinar las propiedades mecánicas a flexión de los tableros se utilizó un total de 5 muestras con dimensiones nominales de 250 mm x 500 mm x 124,3 mm para el prototipo 1 y 150 mm x 300 mm x 74 mm para el prototipo 2, la distancia entre los apoyos y cargas aplicadas se especifica en la **Figura 45**.



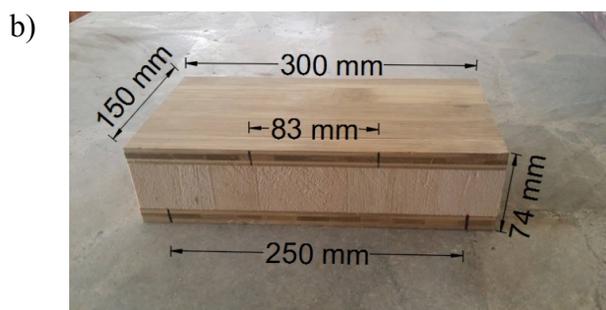


Figura 45 Dimensiones nominales de muestras de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

4.2.4.1. Selección del material

Las 10 muestras utilizadas para el ensayo de flexión, fueron cortadas de paneles grandes cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del panel, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas. La Tabla 11 resume las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.4.2

Tabla 11

Muestras seleccionadas para prueba de flexión

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	ESPESOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPESOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
PFE1-1	124,3	500,1	248,0	PFE2-1	74,0	299,0	150,0
PFE1-2	124,3	500,0	249,0	PFE2-2	74,0	298,0	151,0
PFE1-3	124,3	500,0	249,6	PFE2-3	74,0	299,0	151,0
PFE1-4	124,3	499,0	249,0	PFE2-4	74,0	298,0	151,0
PFE1-5	124,3	500,0	249,4	PFE2-5	74,0	299,9	150,0

Las dimensiones indicadas cumplen con las condiciones que especifica la norma ASTM C393 para una configuración no estándar, las cuales consisten en que el ancho de las muestras no debe ser menor a dos veces el espesor total del tablero, no más de 6 veces el espesor total, ni más grande que la mitad de la longitud. La longitud de las muestras debe ser igual a la longitud entre apoyos, más 50 mm o más una mitad del espesor total, la que sea mayor.

4.2.4.2. Preparación del material

a) Identificación

Para facilitar la identificación de las muestras se les asignó un código que consiste en 5 dígitos: el primer y segundo son para identificar el ensayo al que pertenece la muestra en el presente caso es PF por prueba de flexión, el tercer y cuarto se refieren al espesor de la muestra E1 para el prototipo 1 y E2 para el prototipo 2 y el quinto corresponde a la numeración de la muestra.

b) Dimensiones de apoyo y carga

En las muestras medidas y pesadas, se identificó los puntos de apoyo y de carga para tener una mayor precisión durante el ensayo.

4.2.4.3. Configuración del ensayo

El ensayo se lo realizó en una máquina de ensayos universales marca Amsler de capacidad de carga de 100 Ton. Adicionalmente para la medición de desplazamientos se utilizó un deformímetro electrónico.

Se utilizó barras de carga y de apoyo para que permitan una rotación libre de la muestra durante el ensayo como lo indica la norma ASTM 393. También se utilizó almohadillas de presión de caucho con una dureza de 60 con un ancho nominal de 25 mm y un espesor de 3 mm entre las barras de carga y apoyos para prevenir daño local en los paneles externos de los tableros.

El procedimiento del ensayo de flexión consistió en los siguientes pasos:

- Los apoyos se colocaron a una distancia que depende de cada prototipo, y sobre los mismos se colocó las almohadillas de caucho, como se ve en la **Figura 46**.

- Se colocó la muestra sobre los apoyos y las barras de carga sobre la muestra y se procedió a aplicar la carga perpendicular al plano de los paneles externos a una velocidad constante de 1 mm/seg, el tiempo de duración de cada ensayo fue de 5 minutos.
- Los datos obtenidos en este ensayo fueron de desplazamiento del punto central de la muestra y la fuerza aplicada.

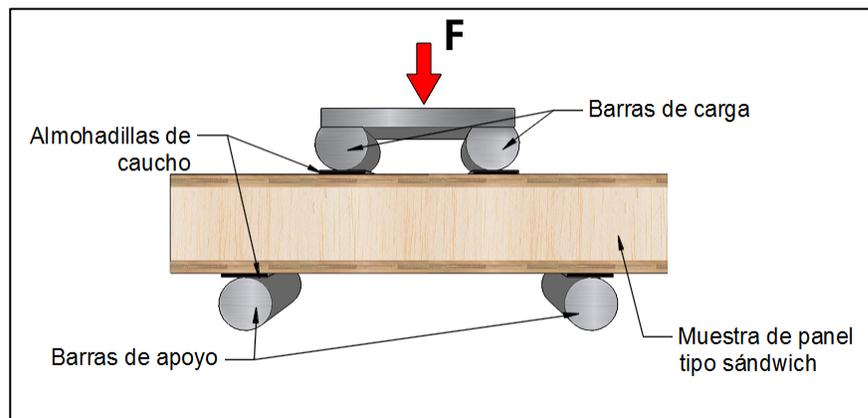


Figura 46 Configuración del ensayo de flexión

4.2.4.4. Cálculos

a) Esfuerzo máximo de corte

El esfuerzo máximo de corte se calculó utilizando la Ecuación 6, indicada en la norma:

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{(d+c) \cdot b} \quad (6)$$

donde τ_{max} es el esfuerzo máximo de corte, P_{max} es la fuerza máxima antes de la falla en N , d es el espesor del sándwich en mm , c es el espesor del núcleo en mm y b es el ancho del espécimen en mm .

b) Módulo de ruptura de flexión de los paneles externos

El Módulo de ruptura de flexión de los paneles externos se calculó con la Ecuación 7, el cual es calculado como valor de referencia en la máxima fuerza aplicada:

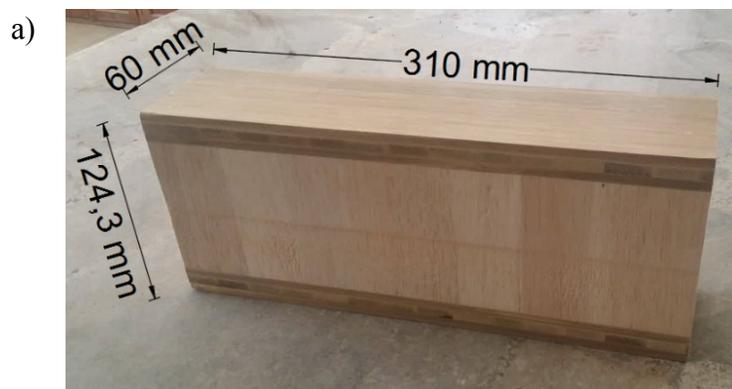
$$MOR_{flex} = \frac{P_{max}S}{3t(d+c)b} \quad (7)$$

donde: MOR_{flex} es el módulo de ruptura de flexión de los paneles externos en MPa , S es la longitud del tramo en mm y t es el espesor de los paneles externos en mm .

4.2.5. Corte

El ensayo de corte realizado en los tableros estructurales tipo sándwich cubre la determinación de la resistencia al cizallamiento paralela al plano de los paneles externos del tablero y el módulo de corte asociado a deformaciones en el plano normal a los paneles externos. Estas propiedades de corte son fundamentales para el diseño de tableros estructurales tipo sándwich y control de calidad del mismo. El ensayo se lo realizó bajo los lineamientos de la normativa ASTM C273 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.

El ensayo de corte se llevó a cabo en 5 muestras por prototipo con dimensiones nominales de 310 mm x 60 mm x espesor del prototipo, como se puede ver en la **Figura 47**.



CONTINÚA 

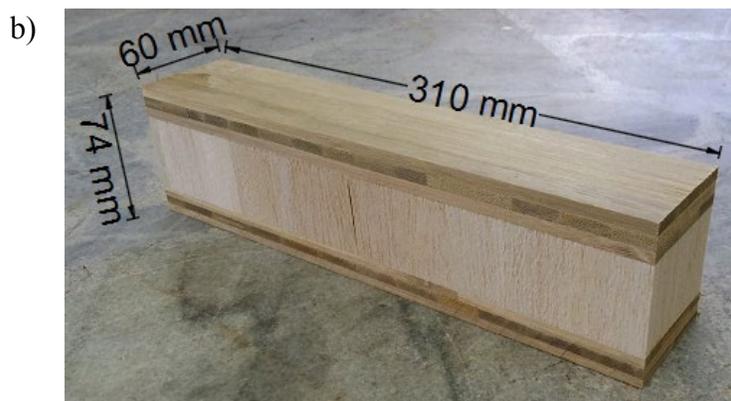


Figura 47 Dimensiones de muestras de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2

4.2.5.1. Selección del material

Las 10 muestras utilizadas para el ensayo de compresión, fueron cortadas de paneles grandes cuyas dimensiones nominales son de 1200 mm x 600 mm x el espesor del panel, asegurándose de que los cortes generen superficies limpias y ángulos rectos en las esquinas. La Tabla 12 resume las muestras seleccionadas en este ensayo, el proceso de identificación de muestras se indica en la sección 4.2.5.2

Tabla 12

Muestras seleccionadas para prueba de tracción

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	ESPESOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	MUESTRA	ESPESOR (mm)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)
PSE1-1	124,3	311,0	62,4	PSE2-1	74,0	312,0	6,0
PSE1-2	124,3	311,0	61,0	PSE2-2	74,0	312,0	6,1
PSE1-3	124,3	311,0	62,0	PSE2-3	74,0	312,0	6,1
PSE1-4	124,3	310,5	60,5	PSE2-4	74,0	311,0	6,2
PSE1-5	124,3	312,0	61,0	PSE2-5	74,0	311,0	6,2

La norma ASTM C273, señala que las dimensiones de las muestras para corte deben cumplir con las siguientes condiciones: i) El espesor de las muestras debe ser igual a la del sándwich, ii) El ancho no debe ser menor a 50 mm y iii) la longitud no debe ser menor a 12 veces el espesor, excepto según lo acordado entre el comprador y el vendedor.

Por limitaciones de los tableros elaborados y de la máquina utilizada para realizar el ensayo no se utilizó la longitud mínima indicada en la norma. Sin embargo, se realizaron varias pruebas hasta encontrar la longitud en la que la falla se daba en el núcleo de balsa, la cual fue de 31 mm.

4.2.5.2. Preparación del material

a) Identificación

La identificación de las muestras consistió en un código de 5 dígitos: el primer y segundo son para identificar el ensayo al que pertenece PS por prueba de corte (shear), el tercer y cuarto se refieren al espesor de la muestra E1 para el prototipo 1 y E2 para el prototipo 2 y el quinto corresponde a la numeración de la muestra.

4.2.5.3. Configuración del ensayo

Para realizar el ensayo se utilizó una máquina universal de ensayos marca Amsler cuya capacidad de carga es de 10 Ton, y placas de acero de igual área de los paneles externos de las muestras.

Para realizar el ensayo se siguió el procedimiento indicado a continuación:

- Las muestras preparadas anteriormente se las adhirió con masilla plástica Mustang a las placas de acero, un día antes de realizar el ensayo.
- Con la muestra adherida a las placas de acero, se colocó en la máquina de ensayos, dándole el ángulo necesario para que la línea de acción de la fuerza de compresión directa pase por las esquinas diagonalmente opuestas del sándwich, como se indica en la **Figura 48**.

- Se procedió a aplicar carga de compresión sobre la muestra colocada a una velocidad constante de 1 mm/seg hasta lograr la ruptura de la muestra, la duración del ensayo fue de 5 minutos por muestra aproximadamente.
- Los datos reportados durante el ensayo fueron de desplazamiento del cabezal de la máquina de compresión y fuerza aplicada.

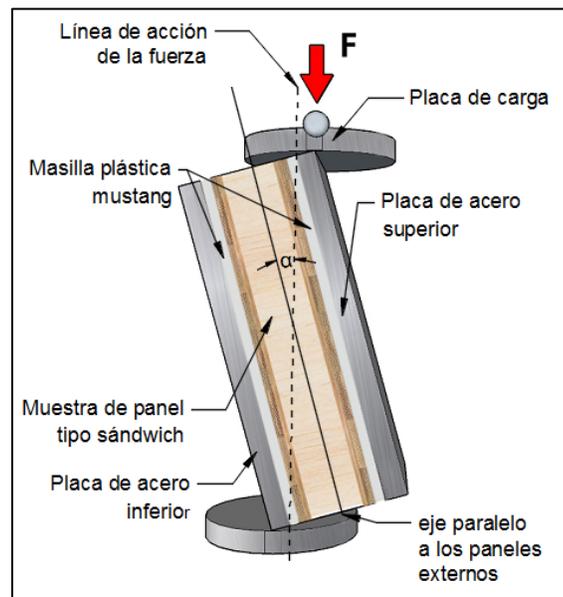


Figura 48 Configuración de ensayo de corte

4.2.5.4. Cálculos

a) Esfuerzo máximo de corte

Se calculó el esfuerzo máximo de corte con la Ecuación 8:

$$\tau_{max} = \frac{P}{Lb} \cos \alpha \quad (8)$$

donde τ_{max} el esfuerzo máximo de corte del núcleo en MPa , P es la carga aplicada en el espécimen en N , L es la longitud del espécimen en mm , b es el ancho del espécimen en mm y α es el ángulo entre la línea de acción de la fuerza y el eje paralelo a los paneles externos.

a) Módulo de corte (G)

El módulo de corte G , también conocido como módulo de rigidez, indica la resistencia a la deflexión de un miembro causado por esfuerzos de corte, este módulo se calculó de acuerdo a la Ecuación 9:

$$G = \frac{St}{Lb} \quad (9)$$

donde G es el módulo de rigidez en MPa , S es la pendiente de la porción inicial de la curva carga vs desplazamiento ($\Delta P / \Delta u$), u es el desplazamiento de las placas de carga en mm y t es el espesor del núcleo en mm .

4.3. Resultados

4.3.1. Resultados de Densidad y contenido de humedad

4.3.2. Paneles de bambú y balsa

Las densidades promedio con su respectivo contenido de humedad de los paneles de balsa y de bambú se muestran en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15.

Tabla 13

Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de balsa e=89 mm

CÓDIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD AL CONTENIDO DE HUMEDAD (kg/cm³)	DENSIDAD SECA (kg/m³)
DNE1.1	12%	78,97	74,67
DNE1.2	13%	98,42	85,92
DNE1.3	11%	127,82	121,36
DNE1.4	11%	115,84	107,50
DNE1.5	12%	159,99	147,36
DNE1.6	12%	218,51	202,14
DNE1.7	13%	173,82	162,95
DNE1.8	12%	185,67	175,18
DNE1.9	12%	139,99	128,86
DNE1.10	11%	202,21	192,18
PROMEDIO	12%	150,12	139,81
CoV	0,063	0,305	0,312

Tabla 14

Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de balsa e=44 mm

CÓDIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD AL CONTENIDO DE HUMEDAD (kg/m³)	DENSIDAD SECA (kg/m³)
DNE2.1	12%	123,73	121,02
DNE2.2	13%	132,17	128,86
DNE2.3	12%	145,99	143,35
DNE2.4	11%	160,43	158,71
DNE2.5	11%	166,49	164,97
DNE2.6	12%	137,62	135,00
DNE2.7	12%	126,52	124,18
DNE2.8	11%	201,41	198,67
DNE2.9	11%	105,08	103,72
DNE2.10	11%	87,17	86,01
PROMEDIO	12%	138,66	136,45
CoV	0,048	0,233	0,235

Tabla 15

Densidad y contenido de humedad promedio de muestras de paneles externos

CÓDIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD AL CONTENIDO DE HUMEDAD (kg/m³)	DENSIDAD SECA (kg/m³)
DC1	14%	647,52	565,86
DC2	15%	681,79	592,34
DC3	15%	643,24	560,73
DC4	15%	676,34	589,28
DC5	15%	669,28	582,48
DC6	14%	650,20	570,37
DC7	14%	677,34	594,79
DC8	14%	612,43	536,90
DC9	14%	677,18	592,08
DC10	14%	648,85	567,20
PROMEDIO	14%	658,42	575,20
CoV	0,028	0,033	0,032

Los paneles de balsa utilizados como núcleo del tablero presentaron densidades variadas como se puede ver en la Tabla 13 y Tabla 14, para el panel de balsa de espesor 89 mm el valor máximo obtenido fue 218,51 kg/m³, el mínimo 78,97 kg/m³, el valor promedio 150,12 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,305. El contenido de humedad para estas muestras fue similar, los valores oscilaron entre 11% y 13%, con un valor promedio de 12% y coeficiente de variación 0,063. La densidad seca para este panel está entre los valores de 74,67 kg/m³ y 202,14 kg/m³, siendo el promedio 139,81 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,312.

El panel de balsa de 44 mm tuvo densidades que variaron entre 87,17 kg/m³ y 201,41 kg/m³, el promedio de estos datos fue 138,66 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,233. El contenido de humedad en porcentaje varió entre 11% y 13%, siendo 12% su promedio y su coeficiente de variación 0,048. La densidad seca tuvo un máximo de 198,67 kg/m³, mínimo 86,01 kg/m³, el promedio 136,45 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,235.

El panel de bambú tuvo un mayor contenido de humedad con un promedio de 14%, la densidad de este panel varió entre 612,43 kg/m³ y 681,79 kg/m³, el valor promedio fue 658,42

kg/m³ y el coeficiente de variación 0,033. La densidad seca tuvo un valor mínimo 536,90 kg/m³, un máximo 592,34 kg/m³ y el promedio de esta serie fue 575,20 kg/m³ con un coeficiente de variación de 0,032.

4.3.3. Tableros estructurales tipo sándwich

Las densidades promedio con su respectivo contenido de humedad de los paneles de balsa y de bambú se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16

Densidad al contenido de humedad y seca de paneles tipo sándwich

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
CÓDIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD AL CONTENIDO DE HUMEDAD (kg/m ³)	DENSIDAD SECA (kg/m ³)	CÓDIGO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	DENSIDAD AL CONTENIDO DE HUMEDAD (kg/m ³)	DENSIDAD SECA (kg/m ³)
PDE1-1	11%	303,35	273,51	PDE2-1	11%	383,17	345,55
PDE1-2	11%	303,58	274,43	PDE2-2	10%	384,01	349,23
PDE1-3	10%	288,94	262,52	PDE2-3	10%	385,36	349,14
PROMEDIO	11%	298,63	270,15	PROMEDIO	10%	384,18	347,97
CoV	0,04	0,03	0,03	CoV	0,06	0,003	0,006

La densidad al contenido de humedad calculada en las muestras del prototipo 1 tuvieron una variación entre 288,94 kg/m³ y 303,35 kg/m³, siendo el promedio 298,63 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,03. La densidad seca tuvo un valor máximo 274,43 kg/m³ y un mínimo 262,52 kg/m³, el valor promedio calculado es 270,15 kg/m³ y el coeficiente de variación para esta serie de datos es 0,03. Adicionalmente, el contenido de humedad calculado estuvo entre 10% y 11%, siendo el promedio 11% y el coeficiente de variación 0,04.

Por su parte la densidad al contenido de humedad calculada en las muestras del prototipo 2 tuvieron una variación entre 383,17 kg/m³ y 385,36 kg/m³, siendo el promedio 384,18 kg/m³ y el coeficiente de variación 0,003. La densidad seca tuvo un valor máximo 349,23 kg/m³ y un mínimo 345,55 kg/m³, el valor promedio calculado es 347,97 kg/m³ y el coeficiente de variación para esta serie de datos es 0,006. Adicionalmente el contenido de humedad calculado estuvo entre 10% y

11%, siendo el promedio 10% y el coeficiente de variación 0,06. A partir de estos resultados, para la determinación de las propiedades mecánicas de compresión, tracción, flexión y corte se asumirá que el contenido de humedad de todas las muestras es del 11%.

4.3.2. Resultados de Compresión

Los valores promedio de MOE_L y MOR_L de compresión en la dirección paralela a los paneles externos del prototipo 1 y 2 se presentan en la Tabla 17 con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 17

Módulo de elasticidad promedio y módulo de ruptura de compresión de prototipos

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	DENSIDAD M.C. 11% (Kg/m ³)	MOE_L (MPa)	MOR_L (MPa)	MUESTRA	DENSIDAD M.C. 11% (Kg/m ³)	MOE_L (MPa)	MOR_L (MPa)
PCE1,1	300,86	8928,10	35,09	PCE2,1	372,53	15044,00	39,92
PCE1,2	308,47	9346,90	37,04	PCE2,2	422,16	15586,00	39,50
PCE1,3	313,35	10293,10	37,86	PCE2,3	411,58	15542,00	39,39
PCE1,4	303,13	9244,80	35,92	PCE2,4	414,11	15291,00	42,11
PCE1,5	311,37	10173,96	35,94	PCE2,5	416,79	15575,00	37,00
PROMEDIO	307,43	9597,16	36,37	PROMEDIO	407,43	15407,60	39,59
CoV	0,02	0,06	0,03	CoV	0,05	0,02	0,05

En la **Figura 49** se grafican las curvas Esfuerzo de compresión-deformación de los dos prototipos con las cuales se determinó el módulo de elasticidad a compresión a través de su pendiente.

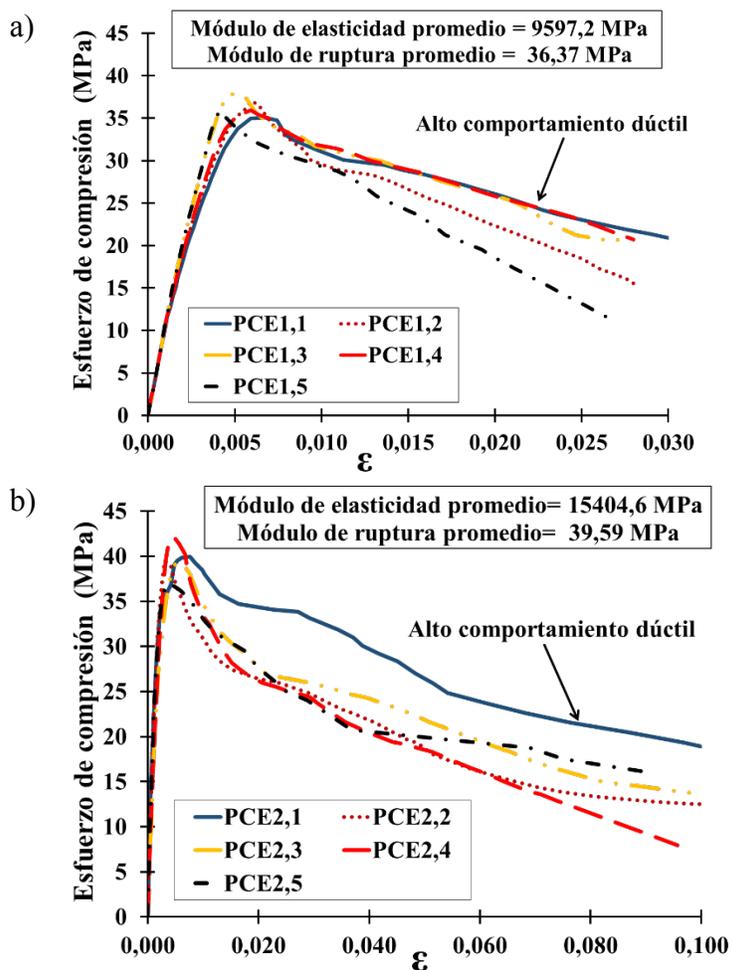


Figura 49 Curvas Esfuerzo de compresión-deformación ensayo de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

La **Figura 50** y **Figura 51** muestran el módulo de elasticidad y de ruptura calculados con su respectiva densidad al contenido de humedad de 11% para las muestras ensayadas. Los resultados en la **Figura 50** muestran una relación de dependencia lineal ($R^2=0.9925$) entre el MOE_L -densidad, lo que indica que la rigidez del material está gobernada por la distribución de densidad del mismo, al igual que el resto de propiedades mecánicas. Pese a que entre MOR_L -densidad se mantiene una relación lineal de dependencia, el coeficiente de determinación $R^2=0.5957$ en la **Figura 51** indica una dispersión de los valores por ser un material compuesto, que combina un material ortotrópico (bambú) y anisotrópico (balsa) con diferentes valores de resistencia y densidad.

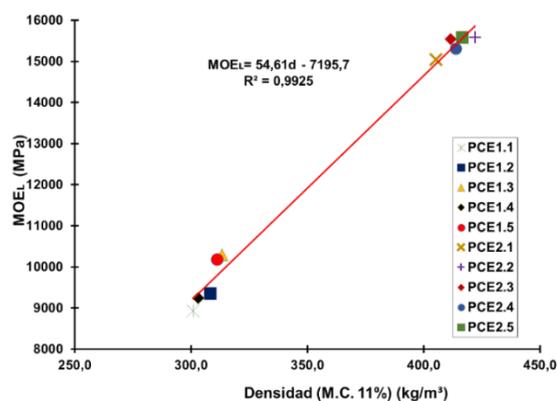


Figura 50 Relación MOE_L -densidad M.C 11%

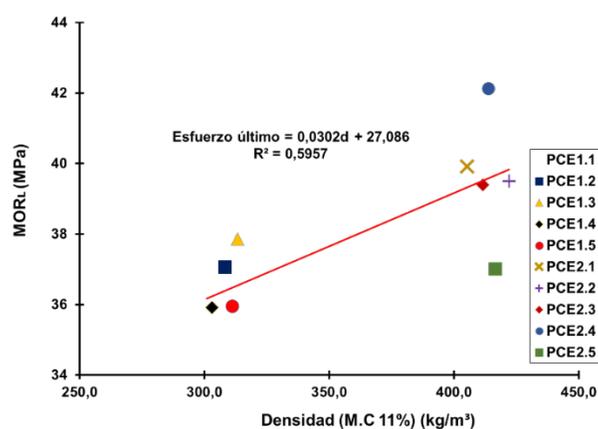


Figura 51 Relación MOR_L -densidad M.C. 11%

El prototipo 1 tuvo un comportamiento bastante dúctil ante cargas de compresión paralela a los paneles externos, como se puede ver en la Figura 49(a). Con las 5 muestras ensayadas se determinó que el MOE_L tuvo un coeficiente de variación de 0,06, los valores oscilaron entre 10293 MPa y 8928,1 MPa calculándose el MOE_L promedio 9597,16 MPa. En términos del MOR_L se obtuvo valores con un coeficiente de variación de 0,03, siendo el máximo valor obtenido 37,86 MPa, el mínimo 35,09 MPa y el promedio 36,37 MPa, estos valores se indican en la Tabla 17.

El prototipo 2 al igual que el prototipo 1 se comportó de manera muy dúctil bajo la carga de compresión aplicada, como se indica en la Figura 49(b). El MOE_L máximo en este prototipo fue de 15586 MPa, el mínimo fue de 15044 MPa, el MOE_L promedio calculado fue de 15407,7 MPa y

el coeficiente de variación para la serie de datos fue de 0,02. Con respecto al MOR_L el valor máximo calculado fue 42,11 MPa, el mínimo 37,00 MPa y el promedio 39,59 MPa, valores cuyo coeficiente de variación fue de 0,05.

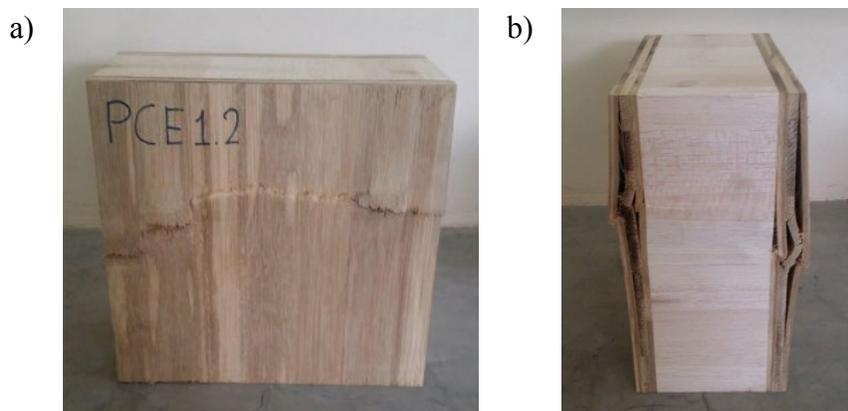
Basándose en las regresiones lineales presentadas en las Figura 50 y Figura 51 se propone las siguientes ecuaciones que expresan los MOE_L (MPa) y MOR_L (MPa) de compresión en función de la densidad (kg/m^3) a un contenido de humedad del 11%.

$$MOE_L = 54,61d - 7195,7 \quad (10)$$

$$MOR_L = 0,0302d + 27,086 \quad (11)$$

La Ecuación 10 y Ecuación 11 son válidas para tableros estructurales tipo sándwich cuyas densidades se encuentren entre $300,86 kg/m^3$ y $410,79 kg/m^3$.

La **Figura 52** presenta la falla identificada en muestras representativas del prototipo 1 y prototipo 2.



CONTINÚA 

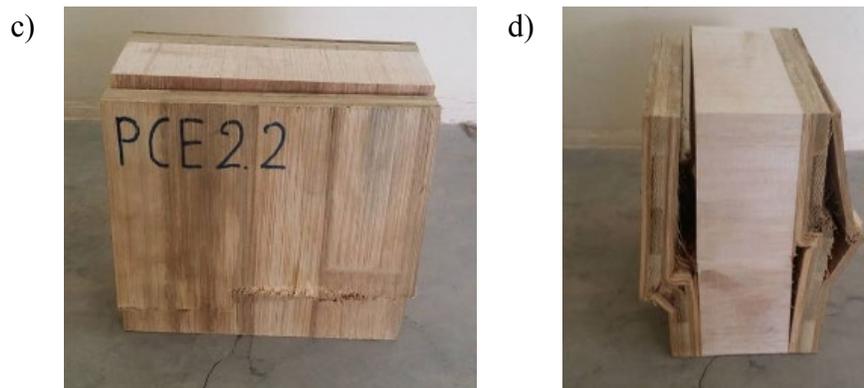


Figura 52 Modo de falla en muestras representativas de compresión a) prototipo 1 vista frontal, b) prototipo 1 vista lateral, c) prototipo 2 vista frontal y d) prototipo 2 vista lateral

El tipo de falla que se identificó en las muestras tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2 fue por aplastamiento de los paneles externos, como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El modo de falla de todas las muestras se puede observar en el Anexo 1 y Anexo 2. Al ser los paneles externos los que presentaron la falla, se puede concluir que éstos son los que soportan la carga de compresión y el núcleo al ser menos denso no presentó otra falla más que aplastamiento.

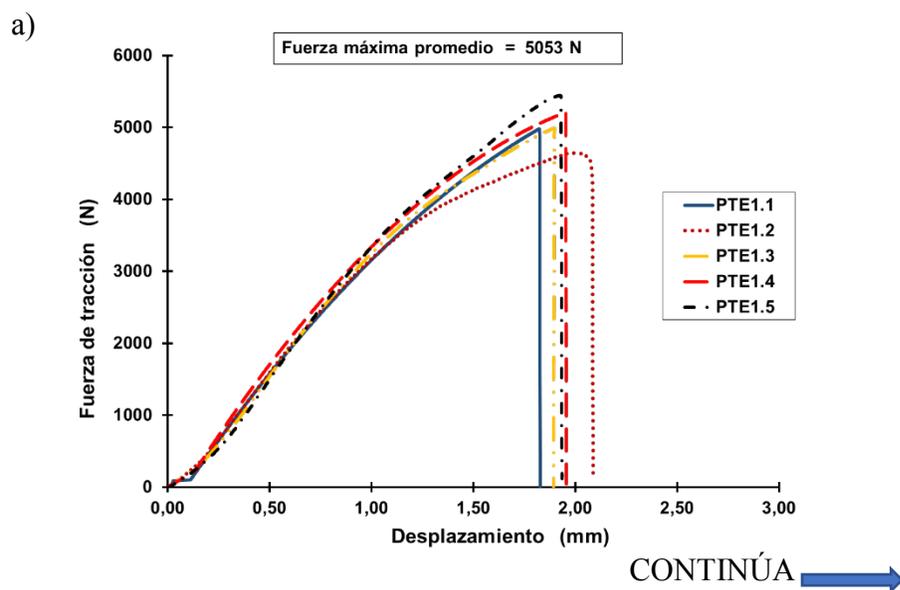
4.3.3. Resultados de Tracción

El valor promedio de módulo de ruptura de tracción del prototipo 1 y 2 se presentan en la Tabla 18 con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 18*Módulo de ruptura de tracción promedio de prototipos*

PROTOTIPO 1			PROTOTIPO 2		
MUESTRA	DENSIDAD (kg/m ³)	MOR TRACCIÓN (MPa)	MUESTRA	DENSIDAD (kg/m ³)	MOR TRACCIÓN (MPa)
PTE1-1	299,74	2,03	PTE2-1	391,89	2,67
PTE1-2	293,01	1,85	PTE2-2	389,57	2,42
PTE1-3	283,23	1,99	PTE2-3	364,65	2,35
PTE1-4	287,43	2,10	PTE2-4	389,89	2,88
PTE1-5	291,65	2,17	PTE2-5	363,41	2,78
PROMEDIO	291,01	2,03	PROMEDIO	379,88	2,62
CoV	0,02	0,06	CoV	0,04	0,09

En la **Figura 53** se grafican las curvas de fuerza-desplazamiento de los dos prototipos.



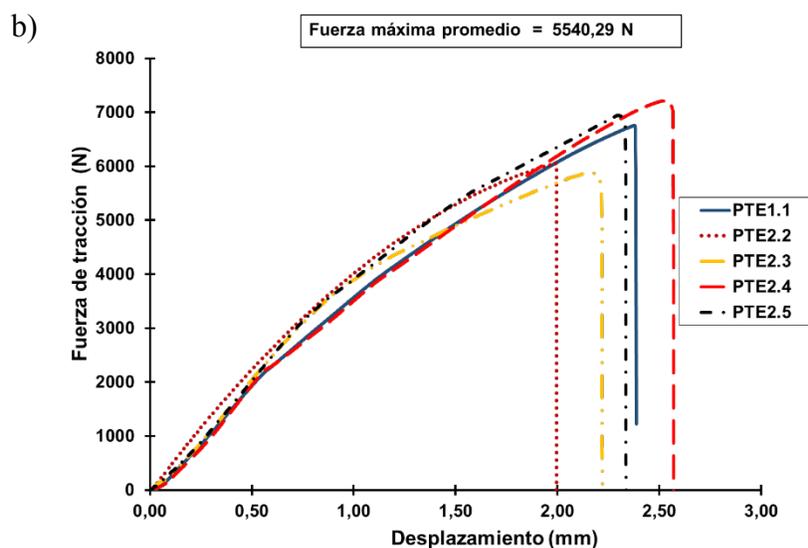


Figura 53 Curvas fuerza-desplazamiento del ensayo de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2

Los resultados de la **Figura 54** muestran una relación de dependencia lineal ($R^2=0,7579$) entre MOR_{trac} -densidad al contenido de humedad de 11%, lo que indica que la resistencia a la progresión de esfuerzos de tracción del material compuesto es directamente dependiente de la distribución de densidad del mismo.

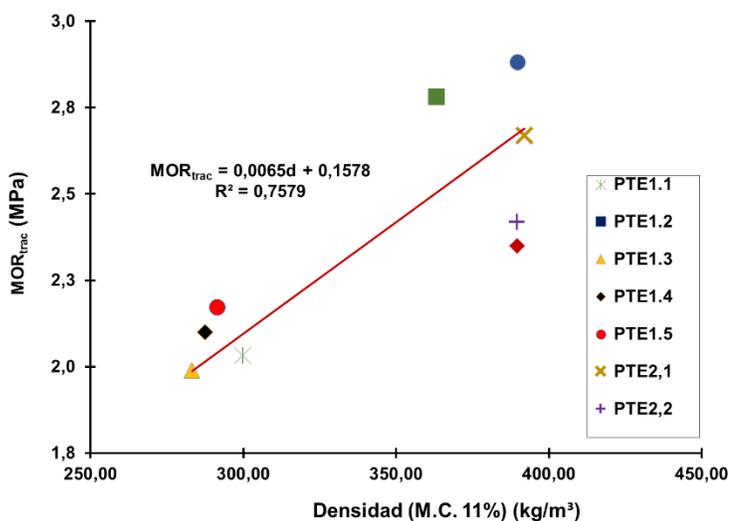


Figura 54 Relación MOR_{trac} -densidad al contenido de humedad

El comportamiento del prototipo 1 sometido a carga de tracción perpendicular al plano de los paneles externos fue frágil, como se puede ver en la Figura 53(a). Los valores de MOR_{trac} tuvieron un coeficiente de variación de 0,06, siendo el máximo valor obtenido 2,17 MPa, el mínimo 1,85 MPa y el promedio 2,03 MPa, estos valores se indican en la Tabla 18. El prototipo 2 tuvo una variación de esta propiedad entre 2,35 MPa y 2,88 MPa, su valor promedio 2,62 MPa y coeficiente de variación de 0,09.

La ecuación que expresa el MOR_{trac} (MPa) en función de la densidad (kg/m^3) se basa en la relación lineal hallada en la Figura 54.

$$MOR_{trac}=0,0065d+0,1578 \quad (12)$$

La Ecuación 12 es válida para tableros cuyas densidades se encuentren entre $283,23 kg/m^3$ y $391,89 kg/m^3$ con un contenido de humedad del 11%.

La **Figura 55** presenta la falla identificada en el ensayo de tracción tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2.



CONTINÚA 



Figura 55 Modo de falla en muestras representativas de tracción a) prototipo 1 y b) prototipo 2

El modo de falla identificado durante este ensayo fue en la unión de las capas de los paneles externos de bambú, este tipo de falla es aceptado por la normativa. La unión de las capas de los paneles externos y la unión entre el núcleo con los paneles externos se consideran las partes más débiles del tablero estructural compuesto tipo sándwich propuesto, el ligante utilizado no brinda una alta transferencia de cargas de los paneles externos al núcleo. Las fallas de todas las muestras se observan en el Anexo 3 y Anexo 4.

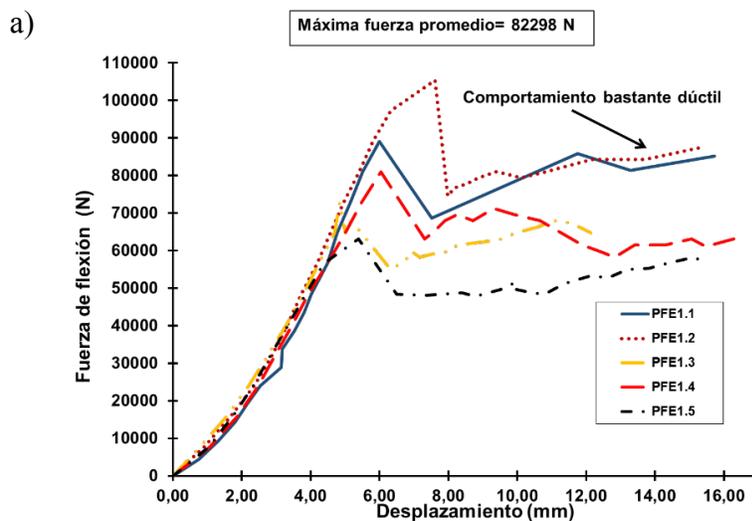
4.3.4. Resultados de Flexión

Los valores promedio del esfuerzo máximo de corte y módulo de ruptura de flexión en los paneles externos del prototipo 1 y 2 se presentan en la Tabla 19 con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 19*Módulo de ruptura de corte y esfuerzo de flexión promedio*

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	DENSIDAD SECA (Kg/m ³)	τ_{max} (MPa)	MOR FLEXIÓN (MPa)	MUESTRA	DENSIDAD SECA (Kg/m ³)	τ_{max} (MPa)	MOR FLEXIÓN (MPa)
PFE1,1	312,37	1,70	14,43	PFE2,1	322,61	2,25	12,51
PFE1,2	328,79	2,00	17,00	PFE2,2	355,06	2,37	13,18
PFE1,3	306,09	1,38	11,72	PFE2,3	352,35	2,33	12,92
PFE1,4	321,57	1,53	13,06	PFE2,4	372,45	2,24	12,45
PFE1,5	305,60	1,19	10,15	PFE2,5	367,41	2,53	14,05
PROMEDIO	314,88	1,56	13,27	PROMEDIO	353,97	2,34	13,02
CoV	0,03	0,2	0,2	CoV	0,05	0,05	0,05

En la **Figura 56** se grafican las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas en el ensayo de flexión de los dos prototipos.

CONTINÚA 

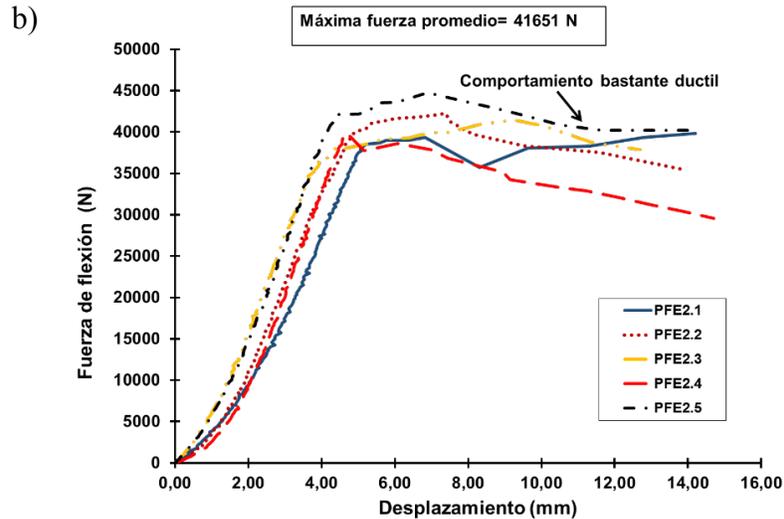


Figura 56 Curvas fuerza-desplazamiento ensayo de flexión
 a) prototipo 1 y b) prototipo 2

La **Figura 57** y **Figura 58** muestran τ_{max} y MOR_{flex} calculados con su respectiva densidad al contenido de humedad de 11% para las muestras ensayadas. Los resultados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran una relación de dependencia lineal ($R^2=0.7285$) entre τ_{max} -densidad, lo que indica que el esfuerzo máximo de corte resistido por el material está gobernada por la distribución de densidad del mismo. Por otro lado, entre MOR_{flex} -densidad se mantiene una relación lineal de dependencia, el coeficiente de determinación $R^2=0.0436$ en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** indica una dispersión de los valores de resistencia por ser un material compuesto, que combina un material ortotrópico (bambú) y anisotrópico (balsa), con diferentes valores de resistencia a corte y densidad.

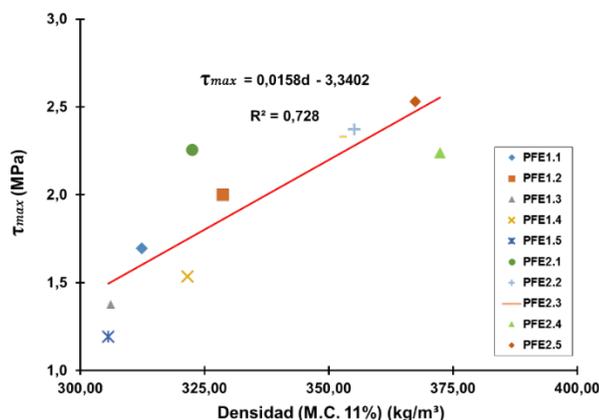


Figura 57 Relación τ_{max} -densidad al 11% de contenido de humedad

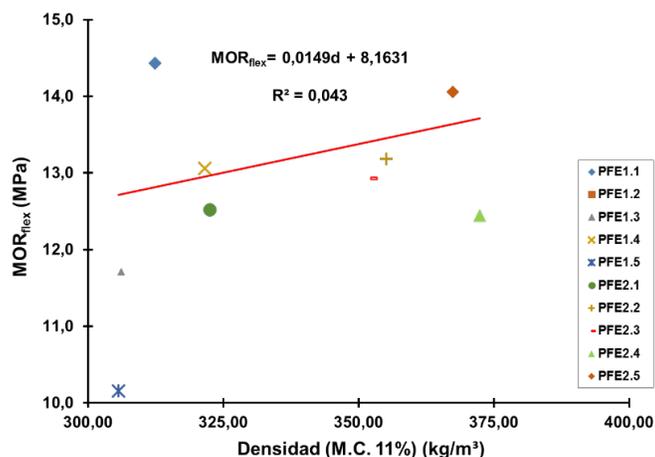


Figura 58 Relación MOR_{flex} --densidad al 11% de contenido de humedad

El prototipo 1 tuvo un comportamiento bastante dúctil ante cargas de flexión perpendicular a las caras como se puede ver en la **Figura 56** (a), los valores del τ_{max} tuvieron un coeficiente de variación de 0,20, los valores de este parámetro oscilaron entre 1,19 MPa y 2,00 MPa, con un valor promedio de 1,56 MPa. Con respecto al MOR_{flex} se obtuvo valores con un coeficiente de variación de 0,02 siendo el máximo valor obtenido 17,00 MPa, el mínimo 10,15 MPa y el promedio 13,27 MPa.

El prototipo 2 al igual que el prototipo 1 se comportó de manera muy dúctil bajo la carga de flexión aplicada, como se indica en la **Figura 56** (b). El τ_{max} en este prototipo fue de 2,53 MPa, el mínimo fue de 2,24 MPa y el τ_{max} promedio calculado fue de 2,34 MPa, el coeficiente de variación para la serie de datos fue de 0,05. Con respecto al MOR_{flex} el valor máximo calculado 14,05 MPa, el mínimo 12,45 MPa y el promedio 13,02 MPa, valores cuyo coeficiente de variación es de 0,05.

Las regresiones lineales presentadas en la **Figura 57** y **Figura 58** permiten proponer las siguientes ecuaciones que expresan el τ_{max} (MPa) y el MOR_{flex} (MPa) en función de la densidad (kg/m^3) a un contenido de humedad del 11%.

$$\tau_{max} = 0,0158d - 3,3402 \quad (13)$$

$$MOR_{flex} = 0,0149d + 8,1631 \quad (14)$$

Las Ecuaciones 13 y 14 son válidas para tableros estructurales tipo sándwich cuyas densidades se encuentren entre $305,60 \text{ kg/m}^3$ y $372,45 \text{ kg/m}^3$.

La **Figura 59** presenta la falla identificada en el ensayo de flexión tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2.



CONTINÚA 



Figura 59 Modo de falla en muestras representativas de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

El modo de falla observado durante el ensayo para ambos prototipos fue cortante en el núcleo de balsa, seguido por la falla del ligante que une los paneles externos con el núcleo, como se puede ver en la **Figura 59**, este tipo de falla se considera aceptable de acuerdo a la norma. Las fallas por flexión en todas las muestras se identifican en el Anexo 5 y Anexo 6.

4.3.5. Resultados de Corte

Los valores promedio del módulo G y τ_{max} del prototipo 1 y 2 se presentan en la Tabla 20 con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 20

Módulo G y τ_{max} promedio

PROTOTIPO 1				PROTOTIPO 2			
MUESTRA	DENSIDAD M.C. 11% (Kg/m ³)	G (MPa)	τ_{max} (MPa)	MUESTRA	DENSIDAD M.C. 11% (Kg/m ³)	G (MPa)	τ_{max} (MPa)
PSE1-1	328,17	100,93	1,33	PSE2-1	409,03	183,22	1,72
PSE1-2	321,16	140,74	1,59	PSE2-2	407,54	153,59	1,47
PSE1-3	317,08	115,30	1,39	PSE2-3	381,46	164,10	1,42
PSE1-4	311,72	160,16	1,4	PSE2-4	392,82	160,47	1,52
PSE1-5	353,17	192,62	1,67	PSE2-5	410,62	199,14	1,51
PROMEDIO	326,26	141,95	1,48	PROMEDIO	400,29	172,10	1,52
CoV	0,05	0,26	0,10	CoV	0,03	0,11	0,07

En la **Figura 60** se grafican las curvas τ_{max} -deformación de los dos prototipos.

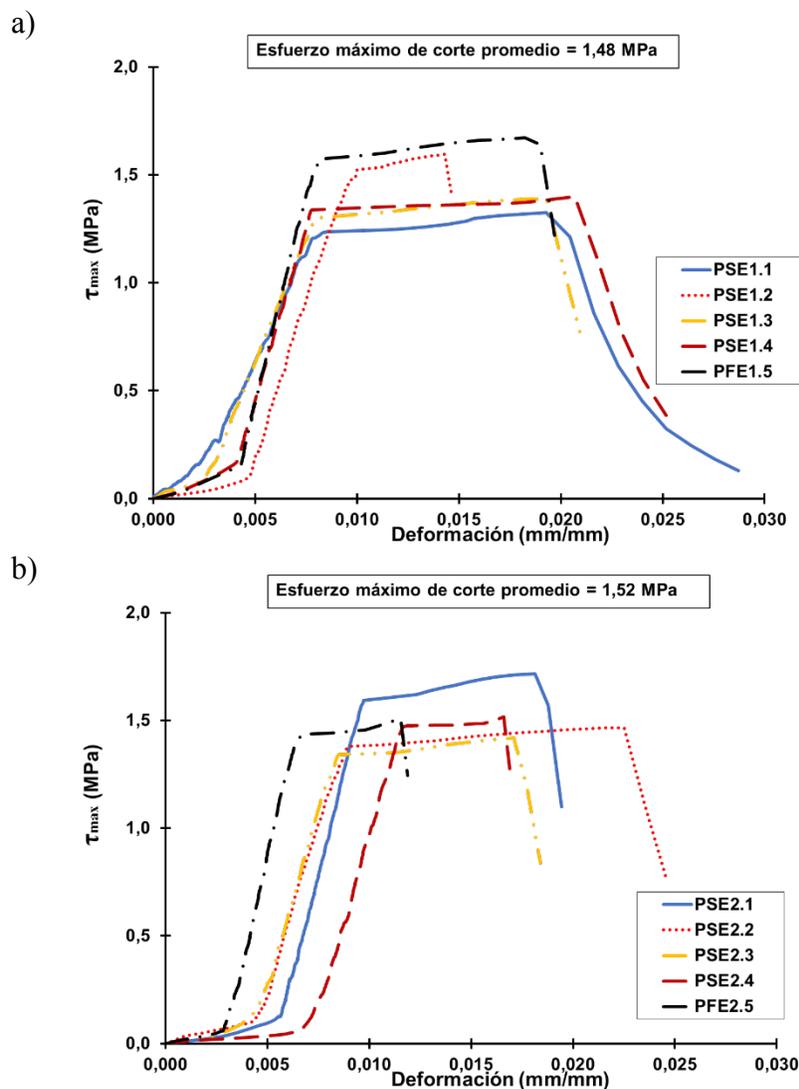


Figura 60 Curvas τ_{max} -deformación ensayo de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2

La **Figura 61** y **Figura 62** muestran el módulo G y τ_{max} calculados con su respectiva densidad al contenido de humedad de 11% para las muestras ensayadas. Los resultados muestran las relaciones de dependencia lineal $R^2=0,3895$ y $R^2=0,3895$ entre módulo G -densidad y τ_{max} -densidad, respectivamente, lo que indica una dispersión de valores debido a la combinación de un material ortotrópico con otro anisotrópico, como se ha explicado anteriormente.

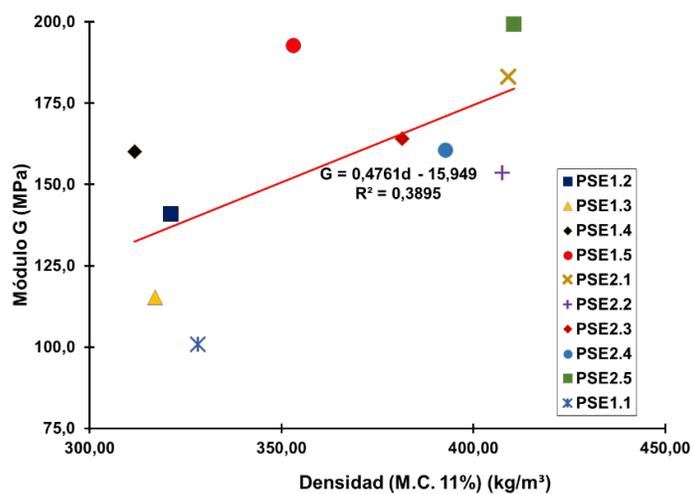


Figura 61 Relación módulo G-densidad al 11% de contenido de humedad

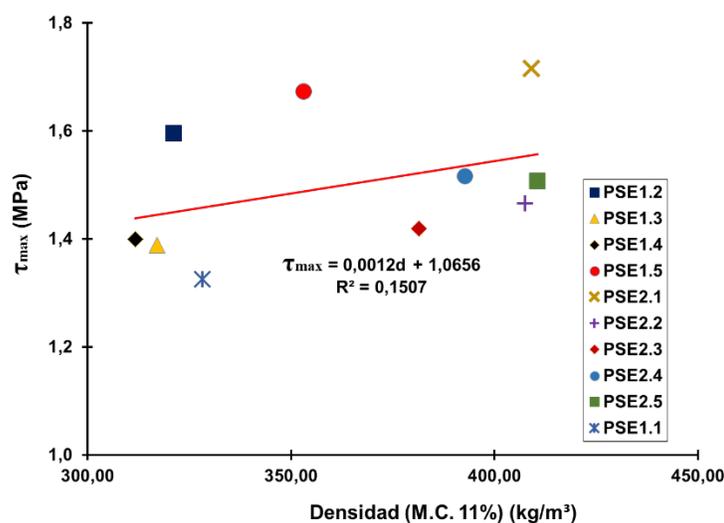


Figura 62 Relación τ_{max} -densidad al 11% de contenido de humedad

El prototipo 1 tuvo un comportamiento frágil bajo cargas de corte paralelo al plano de los paneles externos, como se puede ver en la **Figura 60** (a), los valores calculados de módulo G oscilaron entre 100,93 MPa y 192,62 MPa, siendo el promedio de 141,95 MPa con un coeficiente

de variación de 0,26. Con respecto al τ_{max} se obtuvo valores con un coeficiente de variación de 0,11, siendo el máximo valor obtenido 1,67 MPa, el mínimo 1,33 MPa y el promedio 1,48 MPa.

El prototipo 2 al igual que el prototipo 1 se comportó de manera frágil bajo la carga de corte aplicada, como se indica en la **Figura 60** (b). El módulo G máximo calculado en este prototipo fue 199,14 MPa, el mínimo 153,59 MPa, el promedio calculado 172,10 MPa y el coeficiente de variación para la serie de datos fue de 0,11. Con respecto al τ_{max} el valor máximo calculado es 1,72 MPa, el mínimo 1,42 MPa y el promedio 1,52 MPa y el coeficiente de variación de 0,07.

Con las regresiones lineales mostradas en la **Figura 61** y **Figura 62** se proponen las siguientes ecuaciones que expresan el módulo G y el τ_{max} (MPa) en función de la densidad (kg/m^3) a un contenido de humedad del 11%.

$$G = 0,4761d - 15,949 \quad (15)$$

$$\tau_{max} = 0,0012d + 1,0656 \quad (16)$$

Las Ecuaciones 15 y 16 son válidas para tableros estructurales tipo sándwich cuyas densidades se encuentren entre $311,72 \text{ kg/m}^3$ y $410,62 \text{ kg/m}^3$.

La **Figura 63** presenta la falla identificada en el ensayo de corte tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2.

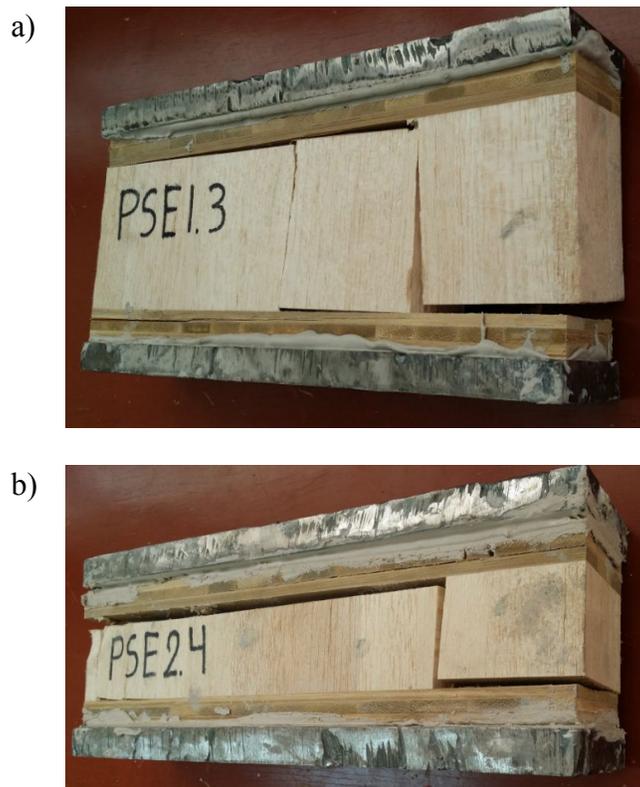


Figura 63 Modo de falla en muestras representativas de corte a) prototipo 1 y b) prototipo 2

Durante el ensayo de corte se observó que el modo de fallo en los 2 prototipos se produjo en el núcleo de balsa, seguido por la falla del ligante que une los paneles externos con el núcleo, como se puede identificar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Dentro de la norma se considera aceptable este tipo de falla, dichas fallas en todas las muestras se encuentran en el Anexo 7 y Anexo 8.

4.4. Discusión

La elaboración de la discusión se la hará mediante el análisis y comparación entre las propiedades obtenidas de cada prototipo, debido a la carencia de estudios de estructuras tipo sándwich con los mismos materiales, densidades y contenidos de humedad.

- Los resultados con respecto a la densidad de los prototipos evaluados indican que se creó tableros con densidades promedio con un contenido de humedad del 11% de 298,63 kg/m³ y 384,18 kg/m³, siendo el prototipo 2 el que tuvo la mayor densidad. Con el análisis de esta propiedad física se infiere que el prototipo 2 presentará las mejores propiedades mecánicas.
- Los paneles de balsa utilizados como núcleo del tablero estructural tipo sándwich aportan con densidades muy variadas que van desde 87,17 kg/m³ hasta 218,51 kg/m³, razón por la cual a lo largo del estudio mecánico se halló muestras con densidades de hasta 420 kg/m³.
- El módulo de elasticidad (MOE_L) promedio en la dirección longitudinal en los prototipos fue de 9597,16 MPa y 15407,7 MPa para el prototipo 1 y 2 respectivamente, se observa una notable diferencia en cuanto a la flexibilidad de cada tablero, el prototipo 1 es más flexible que el prototipo 2, debido a que el panel de balsa tiene un mayor espesor en el prototipo 1. En cuanto al MOR_L de compresión los valores obtenidos 36,37 MPa y 39,59 MPa son muy similares ya que el área resistente de los paneles externos es análoga en ambos prototipos.
- Las relaciones lineales halladas para el MOE_L y MOR_L con la densidad respectivamente, revelan una clara tendencia de incremento de estas propiedades a medida que incrementa la densidad.
- El MOR_{trac} obtenido en el ensayo de tracción en el prototipo 2 (2,62 MPa) es mayor al del prototipo 1 (2,03 MPa), a pesar de que la falla se dio en la zona de unión entre las capas de los paneles externos de bambú, se evidencia una mayor adherencia a medida que incrementa la densidad del prototipo.
- Como resultados del ensayo de flexión se obtuvo el τ_{max} y MOR_{flex} , al comparar los resultados, se identificó al prototipo 2 como el que mejor resiste esfuerzos de corte, y en cuanto al MOR_{flex} , la diferencia entre los valores promedio fue de 1% por lo que se puede concluir que los dos tienen la misma resistencia a flexión, ya que para la determinación de esta propiedad influyen los paneles externos del tablero.

- Las relaciones entre el τ_{max} y MOR_{flex} , con su respectiva densidad indican que el τ_{max} aumenta notablemente con la densidad. Sin embargo, el MOR_{flex} no aumenta significativamente con el incremento del valor de densidad.
- Mediante el ensayo de corte se identifica el módulo de rigidez (G) el cual es mayor para el prototipo 2 con una diferencia del 18% con el prototipo 1. El τ_{max} calculado durante este ensayo no tiene una diferencia mayor al 3% entre los prototipos.
- De las relaciones lineales del módulo G y densidad se obtiene que el módulo G es mayor cuando hay una mayor densidad y en el caso del τ_{max} no aumenta significativamente.
- De los resultados analizados en el ensayo de flexión y de corte se comparó los valores de τ_{max} calculados: para el prototipo 1 se halló una diferencia del 5% y para el prototipo 2 una diferencia del 54%, por lo que el τ_{max} calculado en flexión para el prototipo 2 no se lo tomó en cuenta y se adoptó el calculado en el ensayo de corte.
- Para comprobar los resultados obtenidos en el ensayo de corte se utilizó la ecuación lineal $MOE_L=14,961d-298,49$ establecida por Moncayo (2017), para madera de balsa de Quevedo y se utilizó el rango para el módulo G que se encuentra entre E/20 y E/16, obteniéndose así el rango para una densidad de 87,17 kg/m³, con los valores de 50,28 MPa y 62,85 MPa. En el rango para una densidad de 218,51 kg/m³, se obtuvo los valores entre 148,54 MPa y 185,67 MPa. El módulo G promedio del primer y segundo prototipo se encuentran dentro de los rangos anteriormente indicados.

CAPÍTULO V

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LOS TABLEROS ESTRUCTURALES TIPO SANDWICH

5.1. Introducción

Las estructuras tipo sándwich están diseñadas para tener pequeñas deformaciones laterales y alta resistencia al pandeo más que cualquier otra estructura, debido a su excepcionalmente alta relación de rigidez flexural con respecto a su peso. Su comportamiento es similar a una viga tipo I con la diferencia de que el núcleo de un tablero tipo sándwich es de un material diferente y sirve de apoyo continuo a los paneles externos (Apetre, Sankar, & Ambur, 2008).

Para tener diseños óptimos y seguros de tableros tipo sándwich es necesario tener un buen entendimiento del comportamiento estructural de este tipo de elementos. Según Davies (1993), el método de elementos finitos ha sido el método más favorable para analizar y diseñar un tablero tipo sándwich, ya que puede usarse para tratar formas irregulares de carga con cualquier tipo de condiciones de soporte. Por lo tanto, es necesario desarrollar los modelos computacionales adecuados para poder predecir o verificar las respuestas ante diferentes condiciones de carga.

En el presente capítulo se realiza una descripción de los 40 modelos de elementos finitos realizados, 10 para cada prototipo bajo cargas de compresión y flexión en 4 puntos, con sus respectivas técnicas y métodos utilizados para el análisis del comportamiento biomecánico, siendo dos los parámetros analizados: (i) Teoría de propagación de esfuerzos de Von Mises y (ii) Desplazamiento resultante en la dirección vertical. El análisis de elementos finitos permitió observar la progresión de esfuerzos tanto en el tablero estructural tipo sándwich como material compuesto, así como de sus componentes por separado, es decir, paneles externos y núcleo. Adicionalmente, se realizó un análisis de la eficiencia mecánica de cada uno de los prototipos, mediante el cálculo del índice de comportamiento mecánico en términos de la relación existente entre su rigidez (*MOE*), resistencia (*MOR*) y densidad.

Los resultados y conclusiones de este capítulo se obtuvieron hallando factores de compensación entre los esfuerzos hallados experimentalmente con los del método de elementos finitos y comparandose el índice de comportamiento mecánico de los tableros propuestos con otros materiales convencionales.

5.2. Materiales y métodos

En las siguientes subsecciones se describe la metodología empleada para el desarrollo del modelo de elementos finitos en tres dimensiones, de los tableros estructurales tipo sándwich propuestos y el análisis de elementos finitos realizado para cumplir exitosamente con los objetivos del presente capítulo.

5.2.1. Modelamiento de elementos finitos

5.2.1.1. Detalles del modelo

Los modelos de elementos finitos realizados para esta investigación involucran un análisis estático no-lineal con el uso del software LS-DYNA. Se realizaron una serie de restricciones de acuerdo con la teoría clásica para tableros tipo sándwich establecida por Davies (1987):

- Los paneles externos y el panel de núcleo son materiales linealmente elásticos.
- El esfuerzo de corte en el panel de núcleo es constante a través de su espesor.
- No existe delaminación entre los paneles externos e internos.
- No hay deformación en el panel de núcleo en la dirección perpendicular a los paneles externos.

En el método de elementos finitos se utilizó una forma en tres dimensiones, que consiste en elementos sólidos continuos, es decir, elementos con 8 nudos. Este tipo de método fue seleccionado debido a que proporciona una concordancia con los resultados experimentales, de acuerdo a varias investigaciones (McAndrew, 1999; Narayan Pokharel & Mahendran, 2004; Pozorska, 2018).

5.2.1.2. Propiedades geométricas y condiciones de borde

Las propiedades geométricas de los modelos realizados, cuyas dimensiones son las mismas de las muestras ensayadas a compresión y a flexión para cada prototipo, se obtienen al generar sólidos para cada capa de material del tablero, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Se le asignó a cada capa la dirección de fibras correspondientes a las direcciones X e Y en el caso de los paneles externos de bambú compuestos de 3 láminas cada uno y en la dirección Z en el caso del panel de núcleo de balsa.

La dirección de la carga y las condiciones de borde también se muestran en la **Figura 64** y **Figura 65**, en las cuales se puede identificar que para los modelos de compresión los nudos del panel inferior en el plano YZ, se encuentran empotrados y la carga sobre el panel superior del mismo plano, en la dirección X negativa. En el caso de los modelos de flexión los nudos se encuentran simplemente apoyados en el plano XY en el panel inferior y la carga sobre el panel superior del mismo plano en la dirección Z negativa.

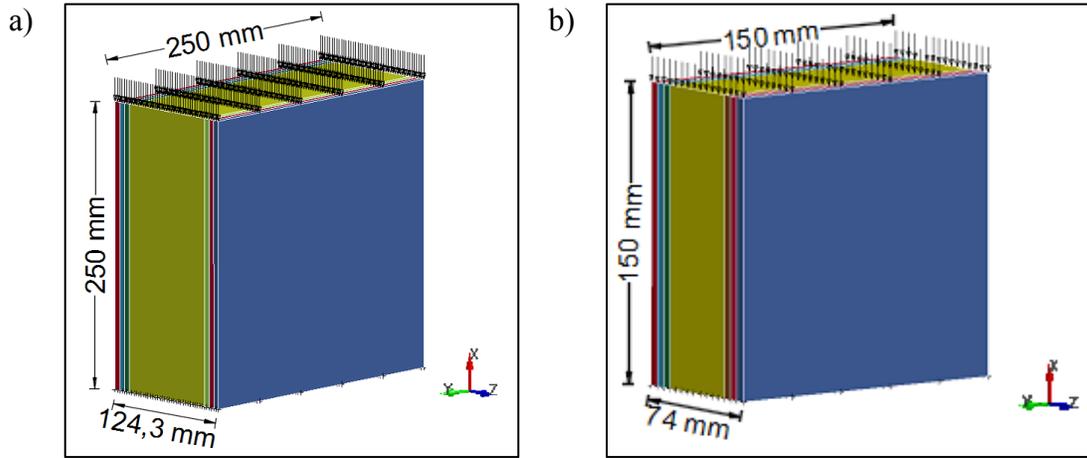


Figura 64 Modelos de elementos finitos de compresión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

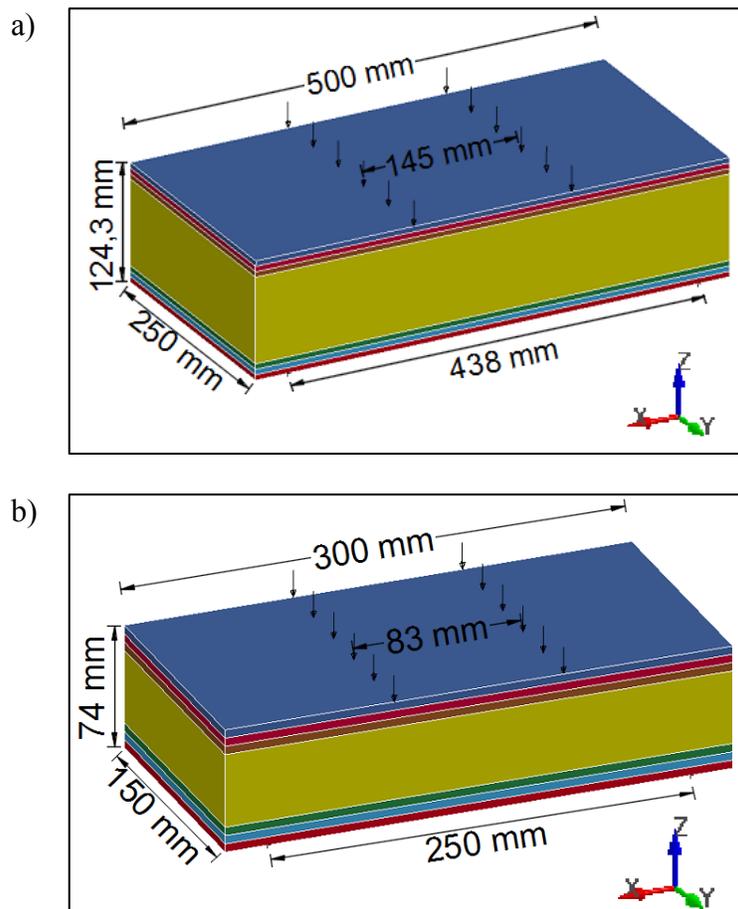


Figura 65 Modelos de elementos finitos de flexión a) prototipo 1 y b) prototipo 2

Para evitar la delaminación entre las capas del tablero se utilizó la opción de contacto *automatic surface to surface* con un coeficiente friccional estático de 1 y un coeficiente friccional dinámico de 2, además se unieron los nudos de una capa con otra, el proceso total de generación de los modelos se describe en el Anexo 9.

5.2.1.3. Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas consideradas para los tableros externos de bambú y el panel de núcleo de balsa fueron derivadas de los resultados de los ensayos de densidad expuestos en el capítulo 4 sección 4.3.2.

Las propiedades mecánicas utilizadas en el modelo son: Módulo de elasticidad (MOE_L) y Coeficiente de Poisson. El valor del MOE_L del panel de núcleo de balsa es 2526 MPa, de acuerdo a la hoja técnica del BALTEK® SB 100 y el Coeficiente de Poisson es 0,018, según la *Tabla 5-2 Coeficientes de Poisson para varias especies a un contenido de humedad del 12%* del Manual de Maderas realizado por Cai and Ross (2010). En el caso de los paneles externos de bambú, el MOE_L es 7420 MPa y el Coeficiente de Poisson es 0,30, según la investigación realizada por Archila, Brandon, Ansell, Walker, and Ormondroyd (2015), estudio en el cual establecen las propiedades mecánicas de paneles bidireccionales de bambú de 3 a 5 capas.

Las propiedades físicas y mecánicas utilizadas para la realización de los modelos de elementos finitos se resumen en la Tabla 21.

Tabla 21
Propiedades físico-mecánicas de los materiales del FEM

PROPIEDAD FÍSICA/MECÁNICA	BAMBÚ	BALSA
DENSIDAD 11% CH (kg/m ³)	658,42	148,00
MOE (MPa)	7420,00	2526,00
μ_{RL}	0,300	0,018

5.2.1.4. Técnica de modelamiento de elementos finitos

El software utilizado para el desarrollo y análisis de los modelos es LS-DYNA, el cual fue seleccionado por ser un programa de elementos finitos de propósito general, capaz de simular problemas complejos del mundo real como el análisis de esfuerzos en estructuras sujetas a una variedad de cargas. Este programa es utilizado por las industrias de automóviles, aeroespaciales, construcción y manufactura, entre otros. Además, su interfaz diseñada para ser eficiente e intuitiva permitió un rápido desarrollo de los modelos y así facilitó el desarrollo de la presente investigación.

La técnica de modelamiento de elementos finitos 3D fue utilizada para discretizar el tablero estructural en “elementos finitos” unidos por nudos, ya que ésta proporciona resultados adecuados en la evaluación de desplazamientos y esfuerzos en el modelo. Se varió el número de elementos a lo largo de la dirección longitudinal, radial y tangencial hasta encontrar la malla adecuada para el análisis (ver sección 5.2.1.7).

5.2.1.5. Condiciones de carga

5.2.1.5.1. Compresión

Los modelos de tableros estructurales tipo sándwich fueron analizados bajo la influencia de dos condiciones de carga; el primero de estos fue bajo una fuerza de compresión paralela al eje X distribuida en la cara superior del plano YZ (ver Figura 64). El valor de la fuerza de compresión aplicada es la carga máxima determinada en el ensayo de compresión, en el prototipo 1 es de 333308,42 N y 197682,45 N en el prototipo 2.

5.2.1.5.2. Flexión

En los modelos de flexión se aplicó una fuerza de compresión paralela al eje Z distribuida en dos franjas del ancho del espécimen a una distancia de $S/3$, siendo S la distancia entre puntos

de apoyo (ver Figura 65), en el prototipo 1 se aplicó una fuerza de 82267,98 N y en el prototipo 2 de 37353,52 N, valores que se determinaron en los ensayos experimentales de flexión.

5.2.1.6. Método seleccionado para medición de la progresión de esfuerzos

El proceso de selección de un método de progresión de esfuerzos es importante para el desarrollo del análisis de elementos finitos. La selección se debe hacer diferenciando las propiedades de material y sus condiciones de carga, ya que de esto dependerá el criterio de falla del material (Khademi-Zahedi, 2018). Durante la fase de experimentación se determinó que los tableros estructurales tipo sándwich tienen un comportamiento elástico hasta el punto de fluencia, por lo cual el método de progresión de esfuerzos debe estar acorde a este tipo de materiales.

El programa LS-Dyna permitió realizar el análisis de progresión de esfuerzos de acuerdo a dos teorías: (i) Esfuerzos principales normales y (ii) Von Mises. A pesar de que los resultados obtenidos de ambas teorías se encontraban acorde a los resultados experimentales, se optó por seleccionar la teoría de Von Mises ya que esta utiliza un criterio de falla elástico y la curva de convergencia obtenida en base a los modelos analizados tuvo una proyección más exacta.

5.2.1.7. Modelo óptimo de convergencia

Los modelos de elementos finitos de tableros estructurales tipo sándwich bajo cargas de compresión y flexión fueron 10 para cada prototipo. Las Tablas 22, 23, 24 y 25 detallan la información de cada modelo analizado. Para definir el modelo óptimo se tomaron en cuenta dos aspectos: (i) una relación de aspecto no mayor a 10 para cada elemento, y (ii) el valor debe encontrarse en la línea de tendencia de la gráfica. Los parámetros analizados en cada modelo fueron: (i) el esfuerzo máximo en la dirección axial en el ensayo de compresión y en la dirección transversal en el ensayo de flexión y (ii) el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga. En los modelos de compresión, se analiza el desplazamiento de los nudos que componen los paneles externos de bambú y en los modelos de corte los nudos del panel de núcleo.

5.2.1.7.1.Compresión

La Figura 66 y Figura 67 muestran que los parámetros analizados empezaron a converger cuando los modelos de tableros estructurales se dividieron en 9,900 elementos para el prototipo 1 y 6,750 en el prototipo 2. A pesar de que estos modelos demostraron resultados razonables, no fueron adoptados debido a que tenían una mayor relación de aspecto que los demás que se encontraban en la línea de convergencia y que además cumplían con los otros requerimientos. Los modelos seleccionados como los más apropiados fueron de 13,750 elementos y 9,375 respectivamente para cada prototipo por tener una relación de aspecto cercano a 1.

Tabla 22*Resultados del estudio de convergencia de compresión del prototipo 1*

Modelo FE	Fuerza de compresión	Número de elementos	Número de divisiones en el modelo FE			Tamaño del elemento			Relación de aspecto			Tiempo de procesamiento del modelo FE	Esfuerzo de compresión Von Mises (MPa)	Desplazamiento Resultante (mm)
			Longitudinal	Radial	Tangencial	(L)	(R)	(T)	L/R	L/T	R/T			
No	(N)		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)						
1	333308,42	625	5	5	6	50,00	50,00	5,67	1,00	8,82	8,82	18 min 17 seg	32,65	1,39
			5	5	16	50,00	50,00	5,56	1,00	8,99	8,99			
2	333308,42	1100	5	5	12	50,00	50,00	2,83	1,00	17,65	17,65	18 min 6 seg	33,12	1,35
			5	5	32	50,00	50,00	2,78	1,00	17,98	17,98			
3	333308,42	2200	10	10	6	25,00	25,00	5,67	1,00	4,41	4,41	57 min 50 seg	34,85	1,32
			10	10	16	25,00	25,00	5,56	1,00	4,49	4,49			
4	333308,42	4950	15	15	6	16,67	16,67	5,67	1,00	2,94	2,94	1 h 56 min	35,11	1,29
			15	15	16	16,67	16,67	5,56	1,00	3,00	3,00			
5	333308,42	6600	10	10	18	25,00	25,00	1,89	1,00	13,24	13,24	2 h 44 min	36,22	1,28
			10	10	48	25,00	25,00	1,85	1,00	13,48	13,48			
6	333308,42	8800	20	20	6	12,50	12,50	5,67	1,00	2,21	2,21	2 h 58 min	37,25	1,25
			20	20	16	12,50	12,50	5,56	1,00	2,25	2,25			
7	333308,42	9900	15	15	12	16,67	16,67	2,83	1,00	5,88	5,88	3 h 15 min	37,33	1,22
			15	15	32	16,67	16,67	2,78	1,00	5,99	5,99			
8	333308,42	13750	25	25	6	10,00	10,00	5,67	1,00	1,76	1,76	3 h 41 min	37,49	1,21
			25	25	16	10,00	10,00	5,56	1,00	1,80	1,80			
9	333308,42	17600	20	20	12	12,50	12,50	2,83	1,00	4,41	4,41	4 h 24 min	37,55	1,20
			20	20	32	12,50	12,50	2,78	1,00	4,49	4,49			
10	333308,42	27500	25	25	12	10,00	10,00	2,83	1,00	3,53	3,53	5 h 36 min	37,78	1,19
			25	25	32	10,00	10,00	2,78	1,00	3,60	3,60			

* *Los resultados sombreados corresponden al modelo de elementos finitos óptimo de compresión del prototipo 1*

Tabla 23*Resultados del estudio de convergencia de compresión del prototipo 2*

Modelo FE	Fuerza de compresión	Número de elementos	Número de divisiones en el modelo FE			Tamaño del elemento			Relación de aspecto			Tiempo de procesamiento del modelo FE	Esfuerzo de compresión Von Mises (MPa)	Desplazamiento Resultante (mm)
			Longitudinal (L)	Radial (R)	Tangencial (T)	(L) (mm)	(R) (mm)	(T) (mm)	L/R	L/T	R/T			
No	(N)		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)						
1	197682,45	375	5	5	6	30,00	30,00	5,00	1,00	6,00	6,00	4 min 52 seg	37,65	1,47
			5	5	9	30,00	30,00	4,89	1,00	6,14	6,14			
2	197682,45	750	5	5	12	30,00	30,00	2,50	1,00	12,00	12,00	17 min 3 seg	38,98	1,43
			5	5	18	30,00	30,00	2,44	1,00	12,27	12,27			
3	197682,45	1125	5	5	18	30,00	30,00	1,67	1,00	18,00	18,00	37 min 57 seg	39,45	1,41
			5	5	27	30,00	30,00	1,63	1,00	18,41	18,41			
3	197682,45	1500	10	10	12	15,00	15,00	2,50	1,00	6,00	6,00	12 min 54 seg	40,48	1,38
			10	10	18	15,00	15,00	2,44	1,00	6,14	6,14			
4	197682,45	3375	15	15	6	10,00	10,00	5,00	1,00	2,00	2,00	25 min 38 seg	41,86	1,35
			15	15	9	10,00	10,00	4,89	1,00	2,05	2,05			
8	197682,45	6000	20	20	6	7,50	7,50	5,00	1,00	1,50	1,50	43 min	42,41	1,32
			20	20	9	7,50	7,50	4,89	1,00	1,53	1,53			
7	197682,45	6750	15	15	12	10,00	10,00	2,50	1,00	4,00	4,00	1 h 35 min	42,48	1,31
			15	15	18	10,00	10,00	2,44	1,00	4,09	4,09			
8	197682,45	9375	25	25	6	6,00	6,00	5,00	1,00	1,20	1,20	1 h 4 min	42,60	1,29
			25	25	9	6,00	6,00	4,89	1,00	1,23	1,23			
9	197682,45	12000	20	20	12	7,50	7,50	2,50	1,00	3,00	3,00	2 h 45 min	42,69	1,28
			20	20	18	7,50	7,50	2,44	1,00	3,07	3,07			
10	197682,45	15000	25	25	12	6,00	6,00	2,50	1,00	2,40	2,40	4 h 10 min	42,73	1,27
			25	25	18	6,00	6,00	2,44	1,00	2,45	2,45			

* *Los resultados sombreados corresponden al modelo de elementos finitos óptimo de compresión del prototipo 2*

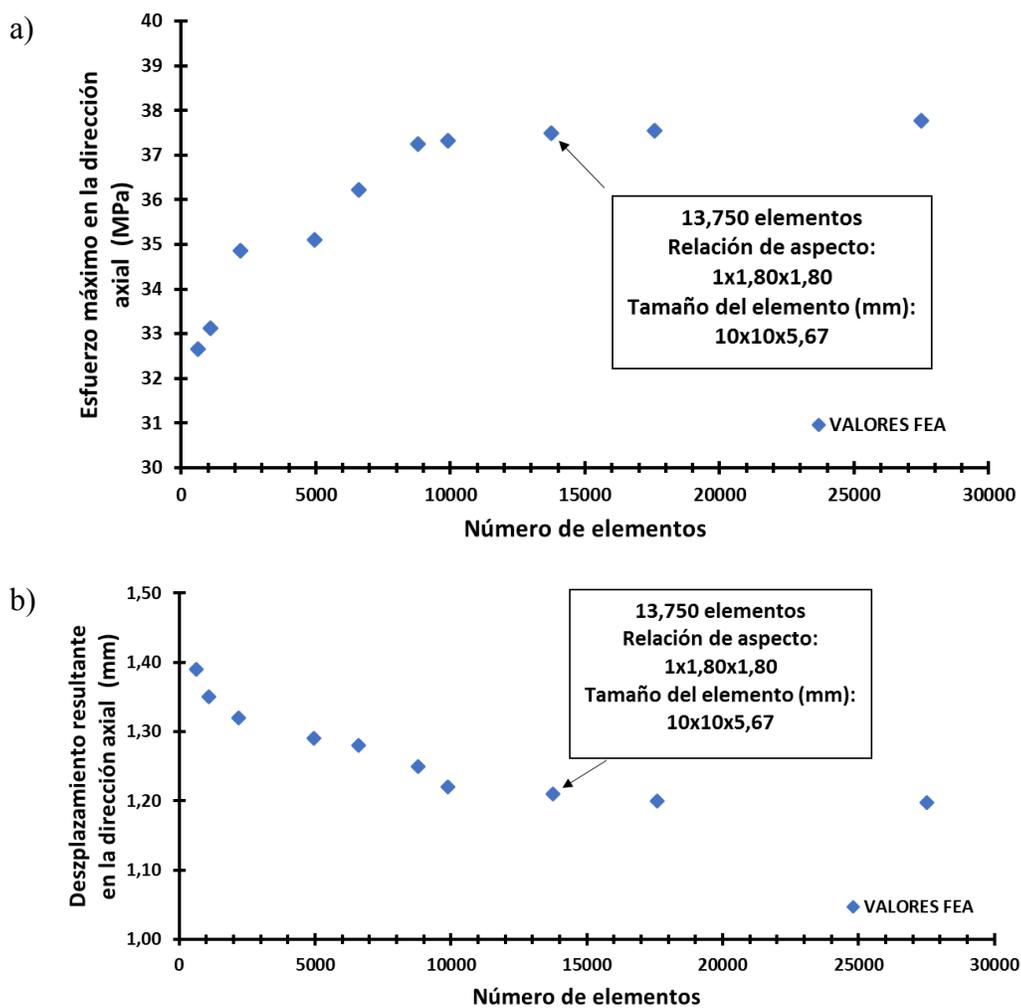


Figura 66 Resultados de convergencia de compresión del prototipo 1 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante

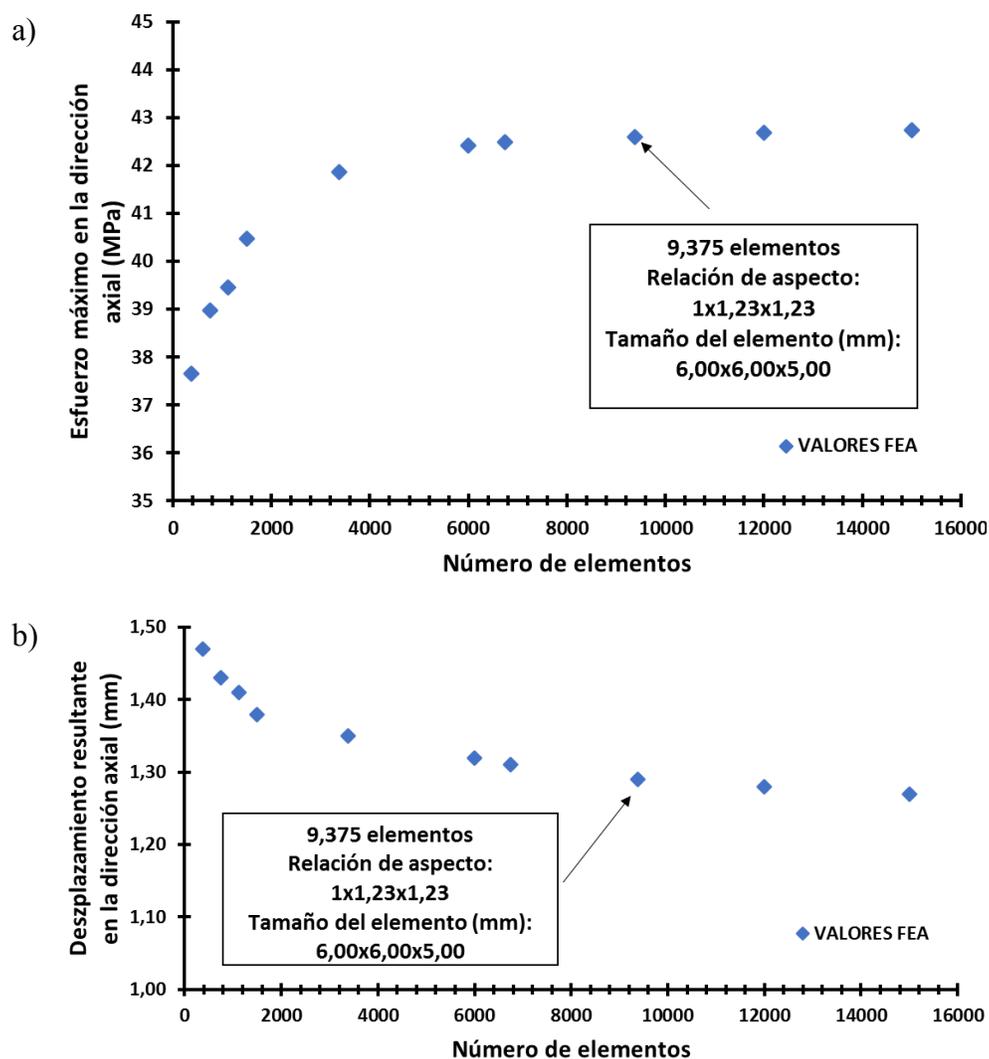


Figura 67 Resultados de convergencia de compresión del prototipo 2 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante

5.2.1.7.2. Flexión

En los modelos de flexión los parámetros analizados empezaron a converger cuando los modelos de tableros estructurales se dividieron en 16,500 y 13,500 elementos respectivamente para cada prototipo, como se puede ver en la Tabla 24 y Tabla 25. Sin embargo, los modelos seleccionados como los más apropiados fueron de 27,720 elementos y 21,600 respectivamente para cada prototipo, por tener una relación de aspecto cercano a 1.

Tabla 24*Resultados del estudio de convergencia de flexión del prototipo 1*

Modelo FE	Fuerza de flexión	Número de elementos	Número de divisiones en el modelo FE			Tamaño del elemento			Relación de aspecto			Tiempo de procesamiento del modelo FE	Esfuerzo de Flexión Von Mises (MPa)	Desplazamiento Resultante (mm)
			Longitudinal (L)	Radial (R)	Tangencial (T)	(L) (mm)	(R) (mm)	(T) (mm)	L/R	L/T	R/T			
No	(N)		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)	L/R	L/T	R/T			
1	82267,98	1650	15	5	6	33,33	50,00	5,67	0,67	5,88	8,82	56 min 40 seg	11,58	14,83
			15	5	16	33,33	50,00	5,56	0,67	5,99	8,99			
2	82267,98	3300	15	10	6	33,33	25,00	5,67	1,33	5,88	4,41	1 h 39 min	12,57	14,24
			15	10	16	33,33	25,00	5,56	1,33	5,99	4,49			
3	82267,98	6600	15	10	12	33,33	25,00	2,83	1,33	11,76	8,82	2 h 56 min	12,94	14,09
			15	10	32	33,33	25,00	2,78	1,33	11,99	8,99			
4	82267,98	9900	30	15	6	16,67	16,67	5,67	1,00	2,94	2,94	3 h 24 min	13,19	13,65
			30	15	16	16,67	16,67	5,56	1,00	3,00	3,00			
5	82267,98	11880	30	18	6	16,67	13,89	5,67	1,20	2,94	2,45	3 h 52 min	13,84	13,36
			30	18	16	16,67	13,89	5,56	1,20	3,00	2,50			
6	82267,98	16500	30	25	6	16,67	10,00	5,67	1,67	2,94	1,76	4 h 32 min	14,39	13,26
			30	25	16	16,67	10,00	5,56	1,67	3,00	1,80			
7	82267,98	19800	30	15	12	16,67	16,67	2,83	1,00	5,88	5,88	5 h 47 min	14,48	13,13
			30	15	32	16,67	16,67	2,78	1,00	5,99	5,99			
8	82267,98	24750	45	25	6	11,11	10,00	5,67	1,11	1,96	1,76	6 h 51 min	14,54	13,09
			45	25	16	11,11	10,00	5,56	1,11	2,00	1,80			
9	82267,98	27720	45	30	6	11,11	8,33	5,67	1,33	1,96	1,47	7 h 33 min	14,61	13,05
			45	30	16	11,11	8,33	5,56	1,33	2,00	1,50			
10	82267,98	29700	45	30	6	11,11	8,33	5,67	1,33	1,96	1,47	8 h 45 min	14,65	13,01
			45	30	16	11,11	8,33	5,56	1,33	2,00	1,50			

* *Los resultados sombreados corresponden al modelo de elementos finitos óptimo de flexión del prototipo 1*

Tabla 25*Resultados del estudio de convergencia de flexión del prototipo 2*

Modelo FE	Fuerza de flexión	Número de elementos	Número de divisiones en el modelo FE			Tamaño del elemento			Relación de aspecto			Tiempo de procesamiento del modelo FE	Esfuerzo de Flexión Von Mises (MPa)	Desplazamiento Resultante (mm)
			Longitudinal (L)	Radial (R)	Tangencial (T)	(L) (mm)	(R) (mm)	(T) (mm)	L/R	L/T	R/T			
No	(N)		(L)	(R)	(T)	(mm)	(mm)	(mm)						
1	37353,52	720	12	5	6	25,00	30,00	5,00	0,83	5,00	6,00	28 min 4 seg	10,59	15,93
			12	5	9	25,00	30,00	4,89	0,83	5,11	6,14			
2	37353,52	1440	12	10	6	25,00	15,00	5,00	1,67	5,00	3,00	57 min 17 seg	11,14	15,58
			12	10	9	25,00	15,00	4,89	1,67	5,11	3,07			
3	37353,52	3300	24	5	6	12,50	30,00	5,00	0,42	2,50	6,00	1 h 11 min	11,84	15,35
			24	5	9	12,50	30,00	4,89	0,42	2,56	6,14			
4	37353,52	6050	24	10	6	12,50	15,00	5,00	0,83	2,50	3,00	2 h 46 min	12,35	15,02
			24	10	9	12,50	15,00	4,89	0,83	2,56	3,07			
5	37353,52	10800	24	15	12	12,50	10,00	2,50	1,25	5,00	4,00	3 h 36 min	12,56	14,94
			24	15	18	12,50	10,00	2,44	1,25	5,11	4,09			
6	37353,52	13500	36	25	6	8,33	6,00	5,00	1,39	1,67	1,20	4 h 11 min	13,30	14,51
			36	25	9	8,33	6,00	4,89	1,39	1,70	1,23			
7	37353,52	16200	36	30	6	8,33	5,00	5,00	1,67	1,67	1,00	4 h 56 min	13,41	14,24
			36	30	9	8,33	5,00	4,89	1,67	1,70	1,02			
8	37353,52	18000	48	25	6	6,25	6,00	5,00	1,04	1,25	1,20	5 h 48 min	13,48	14,21
			48	25	9	6,25	6,00	4,89	1,04	1,28	1,23			
9	37353,52	21600	48	30	6	6,25	5,00	5,00	1,25	1,25	1,00	6 h 41 min	13,58	14,18
			48	30	9	6,25	5,00	4,89	1,25	1,28	1,02			
10	37353,52	27000	36	25	12	8,33	6,00	2,50	1,39	3,33	2,40	7 h 23 min	13,69	14,15
			36	25	18	8,33	6,00	2,44	1,39	3,41	2,45			

* *Los resultados sombreados corresponden al modelo de elementos finitos óptimo de flexión del prototipo 2*

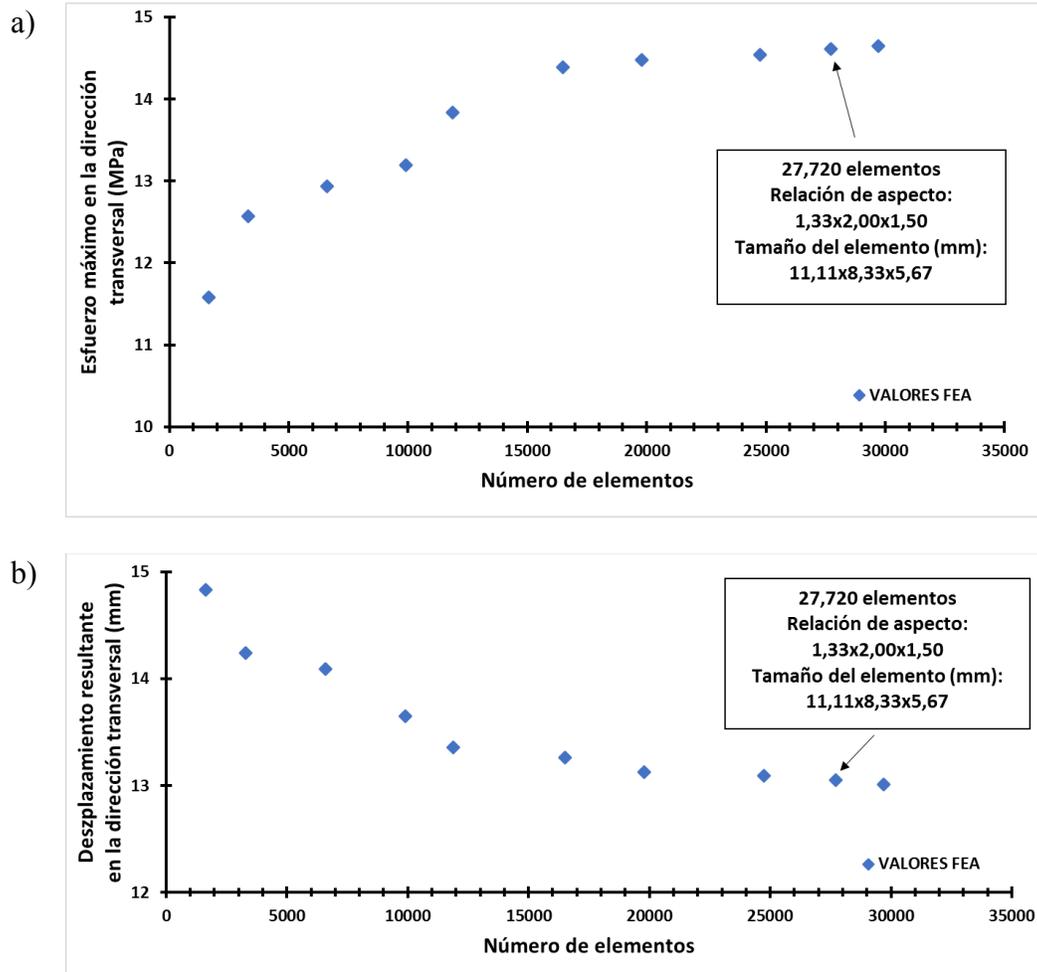


Figura 68 Resultados de convergencia de flexión del prototipo 1 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante

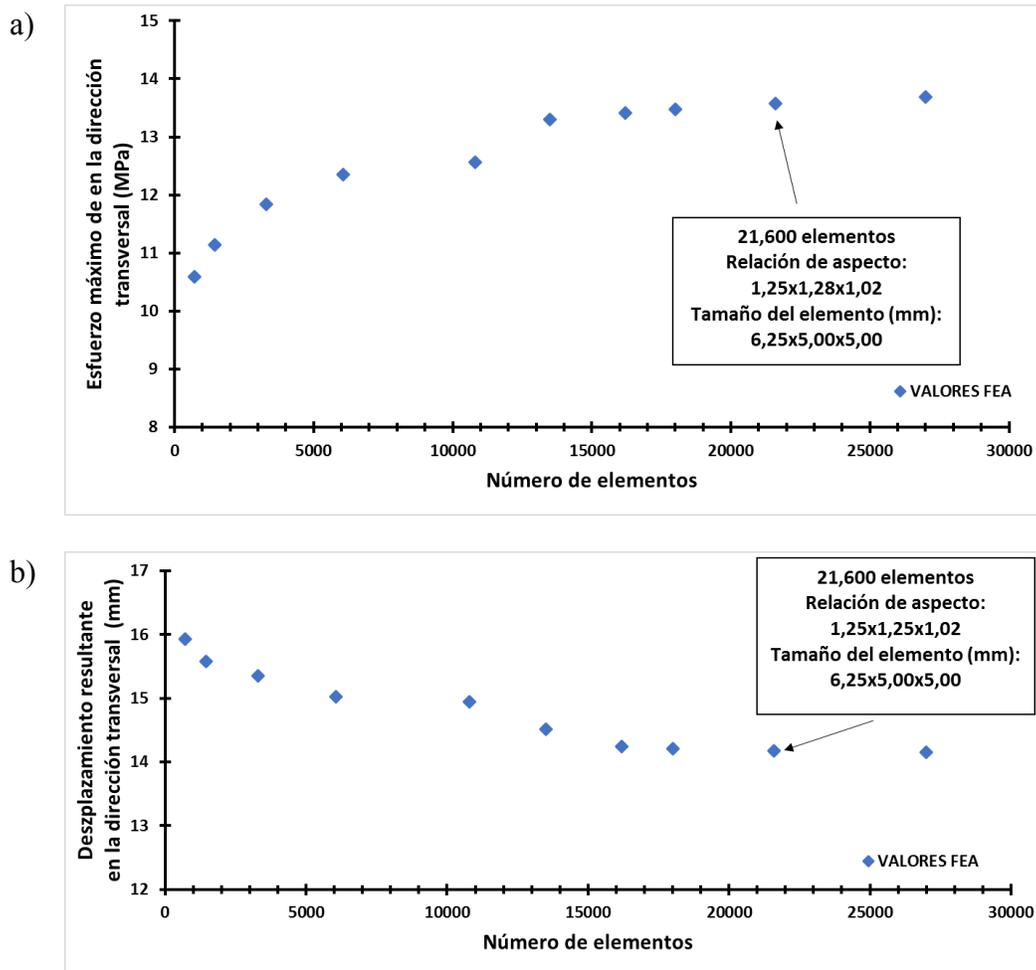


Figura 69 Resultados de convergencia de flexión del prototipo 2 mostrando la relación del número total de elementos con a) el esfuerzo de Von Mises b) el desplazamiento resultante

5.2.2. Análisis de elementos finitos

Los 40 modelos realizados fueron analizados para evaluar la biomecánica de los tableros estructurales tipo sándwich bajo cargas de compresión paralela al plano de los paneles externos y flexión en 4 puntos perpendiculares al plano de los paneles externos.

5.2.2.1. Biomecánica del tablero estructural tipo sándwich

Teóricamente las estructuras tipo sándwich están diseñadas para que los paneles externos delgados con altas propiedades de rigidez y resistencia, sean quienes soporten las cargas de compresión. Por otro lado, el panel de núcleo presenta menor resistencia pero su espesor proporciona al compuesto una gran rigidez a flexión con una baja densidad general (Manalo, Aravinthan, Karunasena, & Islam, 2010)

Durante la fase de experimentación (Capítulo 4) se pudo observar el modo de falla de los tableros estructurales en las condiciones de carga de compresión paralela al plano de los paneles externos y de flexión en 4 puntos con dos barras de carga perpendiculares al plano de los paneles externos. En el ensayo de compresión la falla en las muestras de tablero se produjo por el aplastamiento de los paneles externos de bambú, como se muestra en la Figura 70, por lo que se espera que el modelo tenga una concentración de esfuerzos en esa área.

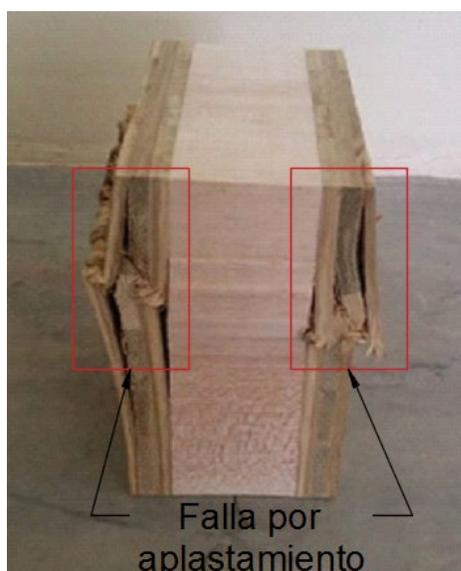


Figura 70 Falla esperada en FEM de compresión

En el ensayo de flexión se observó en las muestras ensayadas una tendencia de falla por cortante en la zona del núcleo, en los modelos de este modo de mecánico se espera que presenten

una concentración de esfuerzos en las zonas laterales del panel de núcleo, como se muestra en la Figura 71.

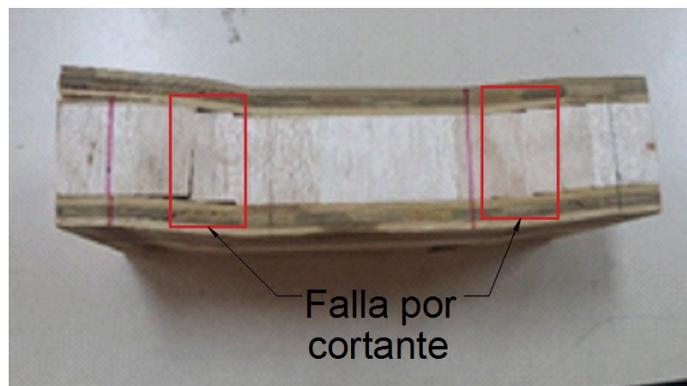


Figura 71 Falla esperada en FEM de flexión

5.2.3. Eficiencia mecánica de los tableros estructurales tipo sándwich

La eficiencia mecánica se define como el comportamiento mecánico de un material por unidad de masa (Gibson, 2012; U. G. Wegst, 2011). El comportamiento de los elementos estructurales se especifica por: (i) requerimientos funcionales (soportar cargas, transmitir calor, almacenar energía, entre otros), (ii) su geometría y (iii) las propiedades del material del cual están elaborados. En muchos casos, función, geometría y propiedades del material son independientes entre sí, lo que implica que se puede realizar una selección óptima entre varios elementos estructurales cuya geometría y función son similares con el índice de comportamiento mecánico del material (Ashby, 2005).

Para identificar el índice de comportamiento mecánico de un elemento es necesario conocer su función, es decir, la función que va a realizar el elemento; la propiedad que se desea maximizar o minimizar del elemento y en qué términos se desea calcular el índice. En el caso de los tableros estructurales tipo sándwich su función es soportar flexión, minimizar su peso, maximizar su resistencia y se desea analizar sus propiedades en términos de rigidez y resistencia.

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

De acuerdo a Ashby (2005), el índice de comportamiento mecánico (PI) de un elemento estructural plano con una determinada rigidez (MOE), densidad, longitud y área transversal, sometido a cargas de flexión está dado por la Ecuación 17:

$$PI = \frac{MOE^{1/3}}{\rho} \quad (17)$$

donde PI está en $GPa^{1/2} m^3 mg^{-1}$, MOE es el módulo de elasticidad en GPa y ρ es la densidad al 11% de contenido de humedad en Mg/m^3 .

La Figura 72 representa la gráfica de comparación entre el Módulo de Young (MOE) en GPa de varios materiales y su respectiva densidad en Mg/m^3 , cuyo rango de elasticidad va desde 10^{-4} GPa en donde se localizan las espumas de baja densidad hasta 1000 GPa la elasticidad del diamante. El rango de la densidad va desde 0,01 Mg/m^3 a 20 Mg/m^3 .

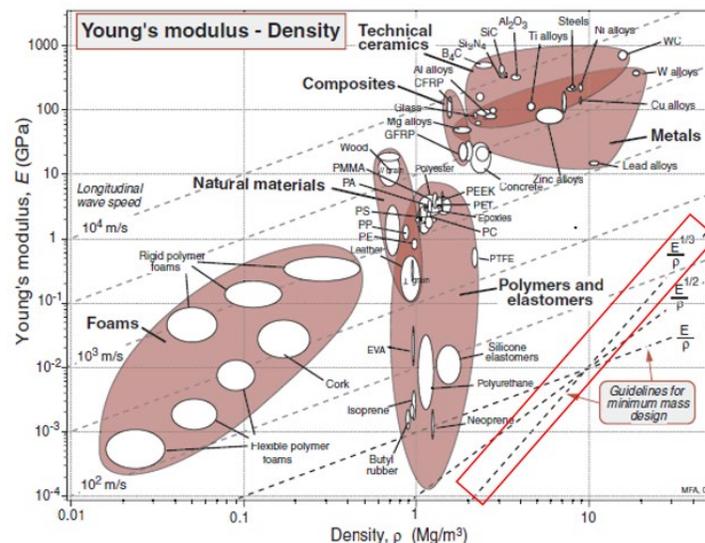


Figura 72 Gráfica de Módulo de Young contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso

Fuente: (Ashby (2005)

Esta gráfica será utilizada para situar los valores del índice de comportamiento mecánico calculado de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich, trazando una línea paralela a la directriz de rendimiento $MOE^{1/3}/\rho$, indicada en la Figura 72 y compararlos con otros materiales que constan en la Figura 72 como metales (Zinc, aluminio y acero, entre otros), materiales compuestos (polímero reforzado con fibra de vidrio, aleaciones de magnesio y hormigón armado), polímeros y elastómeros (poliuretano, neopreno y poliéster, entre otros), materiales naturales (madera) y algunas espumas (corcho y espumas de polímeros flexibles).

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

El índice de comportamiento mecánico del material en términos del módulo de ruptura (MOR) y densidad para un elemento estructural plano con determinada longitud y área transversal sometido a cargas de flexión, está dado por la Ecuación 18:

$$PI = \frac{MOR^{1/2}}{\rho} \quad (18)$$

donde PI está en $MPa^{1/2} m^3 Mg^{-1}$, MOR es el módulo de ruptura en MPa y ρ es la densidad al 11% de contenido de humedad en Mg/m^3 .

La Figura 73 representa la gráfica de comparación entre el módulo de ruptura en MPa de varios materiales y su respectiva densidad en Mg/m^3 . El rango de resistencia va desde 0,01 MPa en donde se localizan las espumas utilizadas en envases y sistemas absorbentes de energía hasta 10^4 MPa, la cual es la resistencia del diamante. El rango de la densidad va desde 0,01 Mg/m^3 a 20 Mg/m^3 .

El módulo de ruptura ubicado en la gráfica varía de acuerdo al material, por ejemplo, en el caso de metales se utiliza el esfuerzo de fluencia, en elastómeros se utiliza el esfuerzo de tensión y para materiales compuestos el módulo de ruptura de compresión. Debido a los diferentes

mecanismos de falla de los materiales se utiliza el símbolo σ_f para representar el esfuerzo máximo de ruptura y obtener una comparación de primer orden (Ashby, 2005).

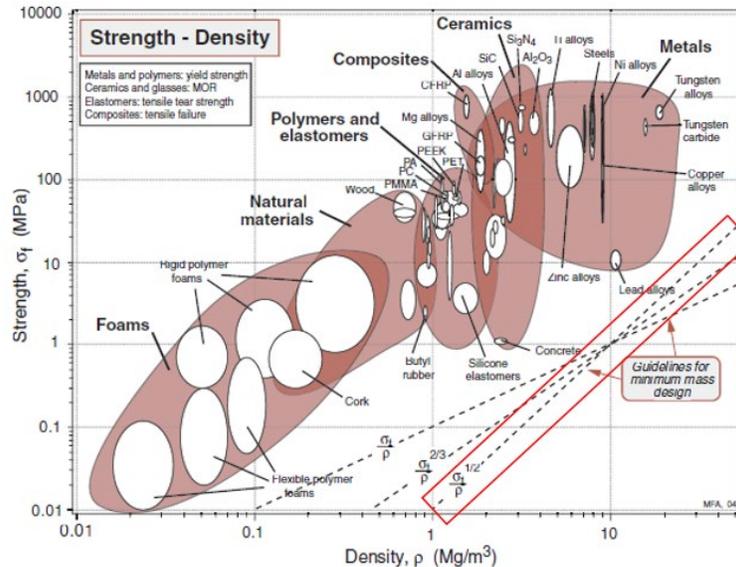


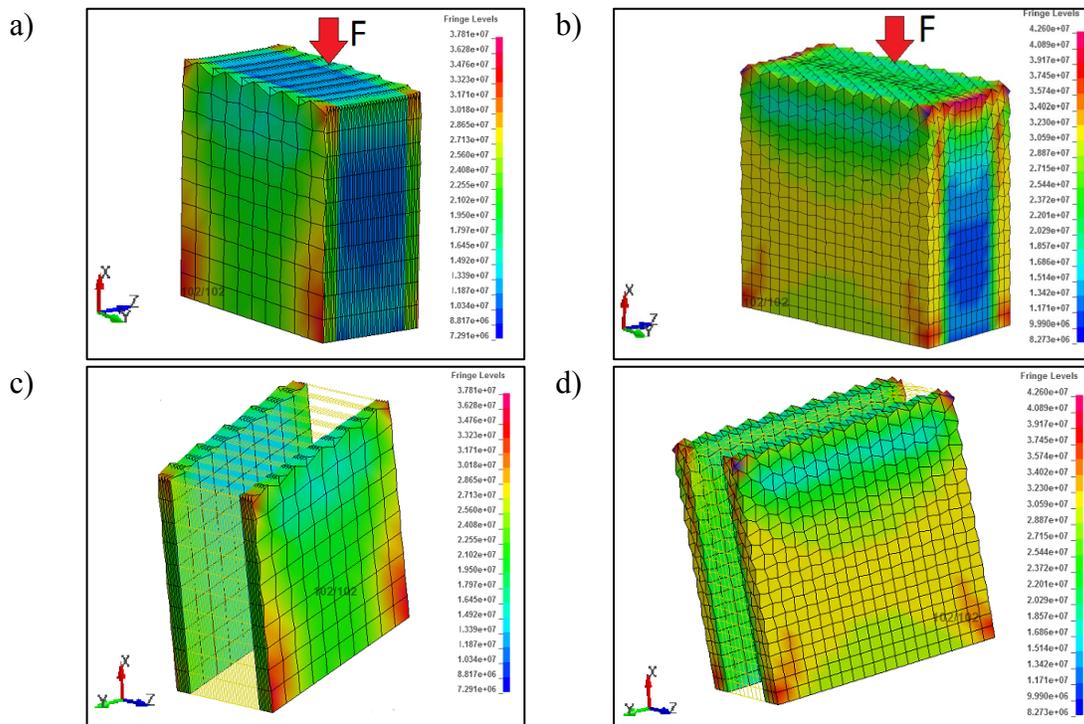
Figura 73 Gráfica de Módulo de ruptura contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso
Fuente: (Ashby (2005))

Esta gráfica será utilizada para situar los resultados del índice de comportamiento mecánico calculado de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich, trazando una línea paralela a la directriz de rendimiento $MOR^{1/2}/\rho$, indicada en la Figura 73 y compararlos con otros materiales que constan en la Figura 73 como metales (Zinc, aluminio y acero, entre otros), materiales compuestos (polímero reforzado con fibra de vidrio, aleaciones de magnesio y hormigón armado), polímeros y elastómeros (poliuretano, neopreno y poliéster, entre otros), materiales naturales (madera) y algunas espumas (corcho y espumas de polímeros flexibles).

5.3. Resultados

5.3.1. Biomecánica de los tableros estructurales tipo sándwich bajo esfuerzos de compresión

Los modelos óptimos de compresión seleccionados en la sección 5.2.1.6 se muestran en la Figura 74, donde se puede identificar con color rojo la concentración de esfuerzos producidos por la carga, cuyos valores máximos son de 37,81 MPa y 42,60 MPa para el prototipo 1 y prototipo 2, respectivamente y se encuentran localizados en la zona de los paneles externos. Adicionalmente, se evidencia que los paneles externos sufrieron deformaciones como se indica en la Figura 74 (c) y (d). Con respecto al núcleo, los esfuerzos se distribuyen a lo largo del panel y los mayores valores se presentan en las zonas periféricas, como se muestra en la Figura 74 (e) y (f), siendo un valor medio de los esfuerzos de 16,45 MPa y 20,29 MPa, respecto a cada prototipo. Los valores obtenidos del desplazamiento resultante para cada prototipo son 1.21 mm y 1.29 mm.



CONTINÚA 

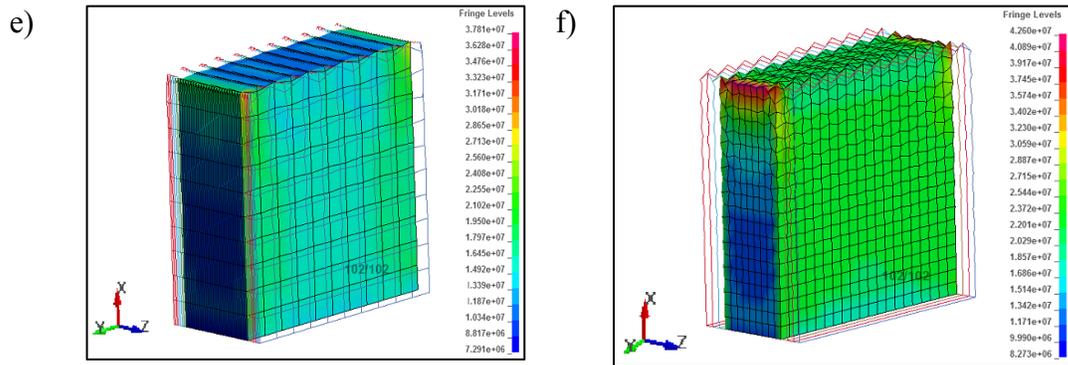


Figura 74 Distribución de esfuerzos de compresión en a) tablero estructural sándwich prototipo 1, b) tablero estructural sándwich prototipo 2, c) paneles externos de bambú prototipo 1, d) paneles externos de bambú prototipo 2, e) panel de núcleo de balsa prototipo

5.3.1.1. Factores de compensación

Los valores de los esfuerzos obtenidos en la experimentación no son exactos debido a factores que influyen en los mismos, tales como fricción entre las placas y los especímenes, aspectos de rigidez de las máquinas en las que se realizaron los ensayos, entre otros, por lo que es necesario compensar los valores tomando como referencia los obtenidos en el análisis de elementos finitos, para lo cual se aplicó la Ecuación 19.

$$\text{Factor de compensación} = \frac{\text{Valor del esfuerzo (FEA)}}{\text{Valor del esfuerzo (experimental)}} \quad (19)$$

La Tabla 26 presenta los valores del esfuerzo máximo promedio de compresión hallados experimentalmente y en el análisis de elementos finitos de los dos prototipos estudiados, calculándose los valores de los factores de compensación, siendo 1,04 para el prototipo 1 y 1,08 para el prototipo 2.

Tabla 26

Factores de compensación para el esfuerzo máximo promedio de compresión

ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN			
	VALOR EXPERIMENTAL PROMEDIO (MPa)	VALOR FEA (MPa)	FACTOR DE COMPENSACIÓN
Prototipo 1	36,37	37,81	1,04
Prototipo 2	39,59	42,60	1,08

La Tabla 27 presenta los valores del desplazamiento resultante en la dirección axial, en el prototipo 1 se obtuvo un valor de 1,21mm y en el prototipo 2 un valor de 1,29mm, el error porcentual fue 10% y 14% en comparación con los desplazamientos promedio experimentales de cada prototipo.

Tabla 27

Error porcentual entre el desplazamiento experimental y FEA

DESPLAZAMIENTO RESULTANTE EN LA DIRECCIÓN AXIAL			
	VALOR EXPERIMENTAL (mm)	VALOR FEA (mm)	ERROR (%)
Prototipo 1	1,33	1,21	10,00
Prototipo 2	1,47	1,29	14,00

5.3.2. Biomecánica de los tableros estructurales tipo sándwich bajo esfuerzos de flexión

La Figura 75(a) y Figura 76(a) muestran los modelos óptimos de flexión del prototipo 1 y 2 bajo la carga máxima promedio hallada en la fase de experimentación. Se observó que inicialmente los paneles externos sufren hendiduras en los puntos de apoyo y carga aplicada con valores de 13,58 MPa y 14,61 MPa para el prototipo 1 y prototipo 2, respectivamente (ver en la Figura 75 (b) y Figura 76 (b)). En el panel de núcleo se observa una distribución de esfuerzos en la zona central con valores aproximados de 5,2 MPa y 2,8 MPa, respecto a cada prototipo, los

esfuerzos tienden a aumentar en la zona de las esquinas, lo cual indica delaminación de los paneles externos.

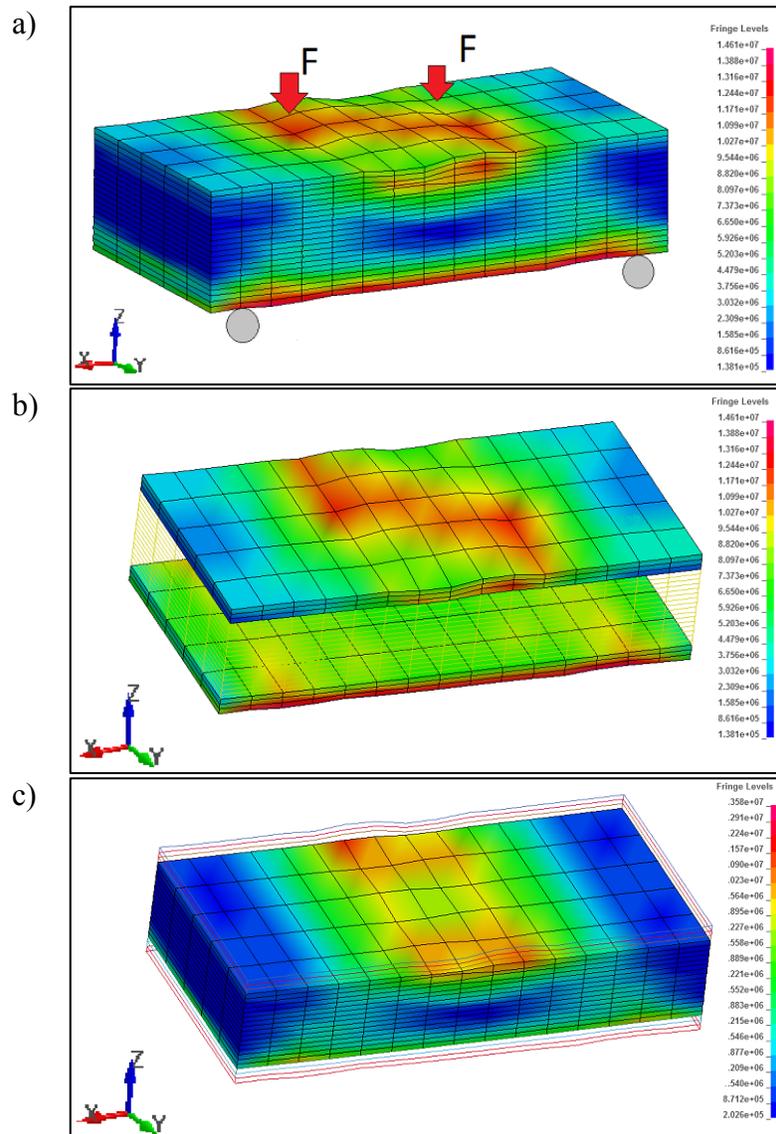


Figura 75 Distribución de esfuerzos de flexión del prototipo 2 en a) tablero estructural sándwich b) paneles externos de bambú y c) panel de núcleo de balsa

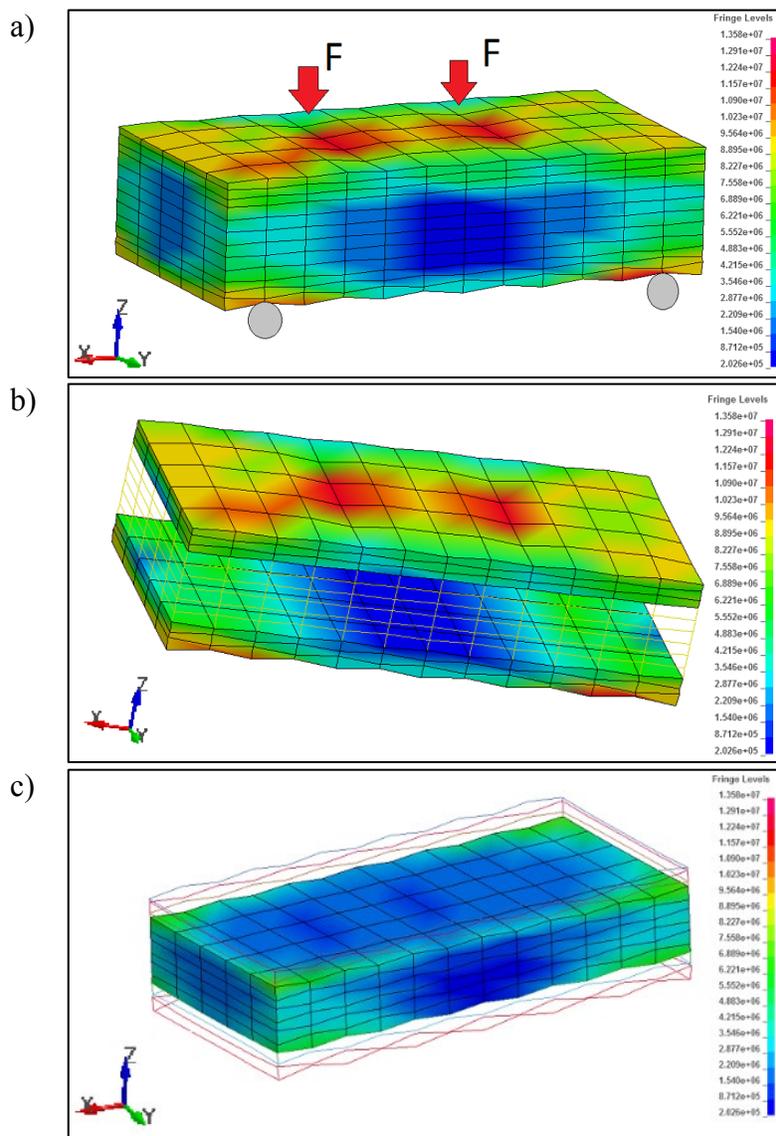


Figura 76 Distribución de esfuerzos de flexión del prototipo 2 en a) tablero estructural sándwich b) paneles externos de bambú y c) panel de núcleo de balsa

5.3.2.1. Factores de compensación

La Tabla 28 presenta los valores del esfuerzo máximo promedio de flexión hallados experimentalmente y en el análisis de elementos finitos de los dos prototipos estudiados, siendo 1,02 para el prototipo 1 y 1,12 para el prototipo 2, valores calculados en referencia a la Ecuación 19.

Tabla 28

Factores de compensación para el esfuerzo máximo promedio de flexión

ESFUERZO MÁXIMO DE FLEXIÓN			
	VALOR EXPERIMENTAL PROMEDIO (MPa)	VALOR FEA (MPa)	FACTOR DE COMPENSACIÓN
Prototipo 1	13,27	13,58	1,02
Prototipo 2	13,02	14,61	1,12

La Tabla 29 presenta los valores del desplazamiento resultante en la dirección transversal, en el prototipo 1 se obtuvo un valor de 13,05 mm y en el prototipo 2 un valor de 14,18 mm. El error porcentual fue del 15% y 11% en comparación con los desplazamientos promedio experimentales de cada uno, esto se debe a que en la experimentación hubo una falla por cortante en el núcleo, lo que permitió un mayor desplazamiento.

Tabla 29

Error porcentual entre el desplazamiento experimental y FEA

DESPLAZAMIENTO RESULTANTE EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL			
	VALOR EXPERIMENTAL (mm)	VALOR FEA (mm)	ERROR (%)
Prototipo 1	15,00	13,05	15,00
Prototipo 2	15,71	14,18	11,00

5.3.3. Eficiencia mecánica

5.3.3.1. En términos de densidad y rigidez del material

Los valores calculados del índice de comportamiento mecánico (PI) se indican en la Tabla 30, siendo así el prototipo 1 más eficiente en términos de comportamiento mecánico con un valor de 6.91. Adicionalmente, para efectos de comparación y análisis se calculó el PI del ladrillo, concreto, acero y madera. El prototipo 1 tiene 4,59 veces mejor comportamiento mecánico que el

ladrillo, 5,43 veces mejor que el concreto, 9,36 veces mejor que el acero y con respecto a la madera es 2,12 veces superior.

Tabla 30
Índices del comportamiento mecánico calculados

	MOE	DENSIDAD 11% C.H.	PI
	(MPa)	(kg/m ³)	(GPa ^{1/3} m ³ Mg ⁻¹)
Prototipo 1	9597,16	307,43	7,12
Prototipo 2	15407,60	413,97	6,48
Ladrillo	30000,00	2000,00	1,55
Concreto	31500,00	2400,00	1,31
Acero	207500,00	7800,00	0,76
Madera	13000,00	700,00	3,35

La Figura 77 muestra los puntos P1 y P2 ubicados en la gráfica que relaciona el Módulo de Young versus su densidad; donde P1 es el prototipo 1 y P2 el prototipo 2. Se trazó una línea paralela a la directriz de rendimiento $MOE^{1/3}/\rho$, lo que indica que los materiales que se ubican por debajo de la directriz tienen menor eficiencia mecánica que los prototipos de tablero estructural tipo sándwich en términos de MOE y densidad. Por lo que, el alto índice de comportamiento mecánico de los tableros propuestos en términos de rigidez y densidad revela que son más eficientes ante cargas de flexión que metales (Zinc, aluminio y acero, entre otros), materiales compuestos (polímero reforzado con fibra de vidrio, aleaciones de magnesio y hormigón armado), polímeros y elastómeros (poliuretano, neopreno y poliéster, entre otros), materiales naturales (madera) y algunas espumas (corcho y espumas de polímeros flexibles); y sólo son superados por algunas espumas rígidas de poliuretano.

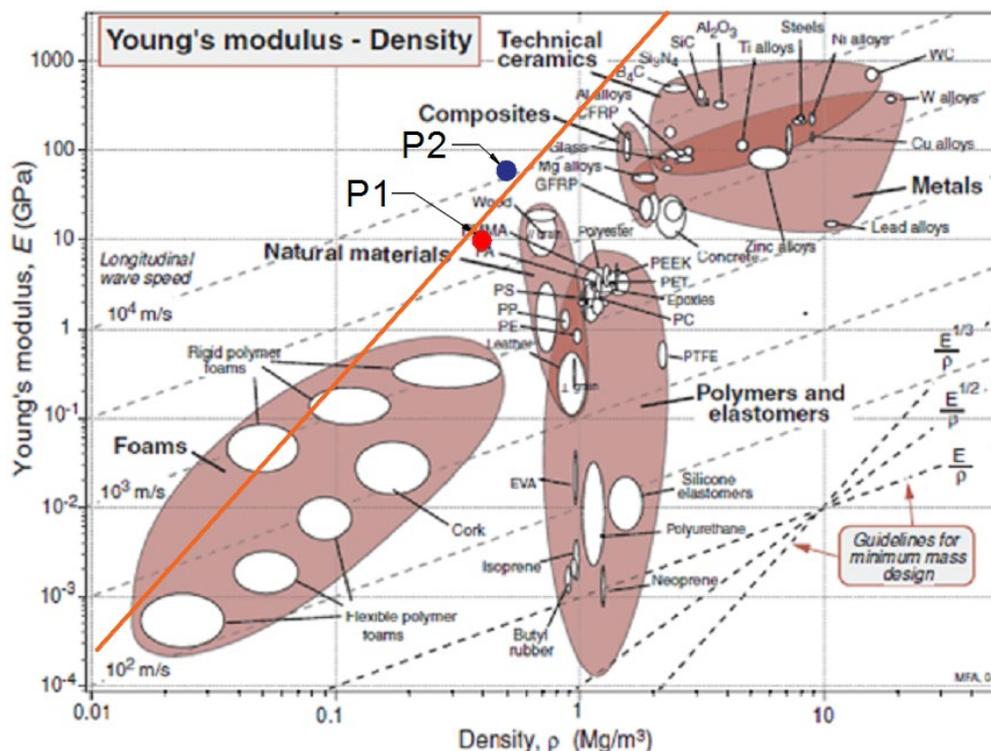


Figura 77 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en gráfica de Módulo de Young contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso

5.3.3.2. En términos de densidad y resistencia del material

Los valores calculados del índice de comportamiento mecánico del material (PI) se indican en la Tabla 31. El prototipo 1 es el que mayor eficiencia mecánica posee en términos de resistencia a esfuerzos por unidad de masa. Este prototipo a comparación de otros materiales tiene una eficiencia mecánica 4,23 veces superior al ladrillo, 7,28 veces mayor que el concreto, 5,77 veces mayor que el acero y en comparación con otras maderas es el 2,04 veces mayor.

Tabla 31
Índices de comportamiento mecánico calculados

	MOR	DENSIDAD 11% C.H.	PI
	(MPa)	(kg/m ³)	(MPa ^{1/2} m ³ Mg ⁻¹)
Prototipo 1	37,81	307,43	20,59
Prototipo 2	42,60	413,97	16,99
Ladrillo	95,00	2000,00	4,87
Concreto	46,00	2400,00	2,83
Acero	777,50	7800,00	3,57
Madera	50,00	700,00	10,10

La Figura 78 muestra los puntos P1 y P2 ubicados en la gráfica que relaciona el *MOR* y su densidad, donde P1 es el prototipo 1 y P2 el prototipo 2. Se trazó una línea paralela a la directriz de rendimiento $\sigma_f^{1/2}/\rho$, a partir de la cual hacia la derecha son materiales cuya eficiencia mecánica en términos de *MOR* y densidad son menores a la de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich. En conclusión, los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich tienen una mayor eficiencia mecánica que metales, materiales compuestos, polímeros y elastómeros, materiales naturales y algunas espumas; y sólo son sobrepasados por espumas híbridas de polímero.

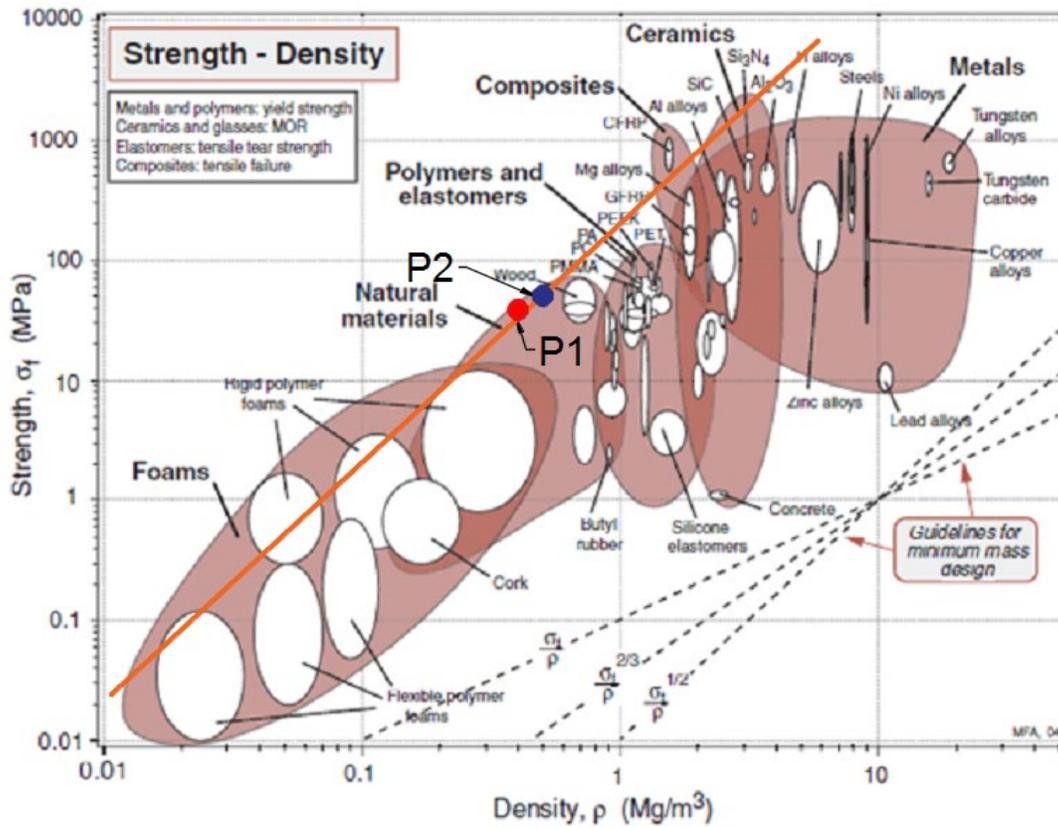


Figura 78 Ubicación de los prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en gráfica de Módulo de ruptura contra densidad con lineamientos para el diseño de materiales con mayor resistencia y menor peso

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS TABLEROS PROPUESTOS Y COMPARACIÓN CON MATERIALES CONVENCIONALES

6.1. Carga axial admisible

Los estudios realizados por Allen (2013) y Davies (2008), describen los modos de falla producidos por una carga axial de compresión, de acuerdo a la teoría de tableros tipo sándwich, los cuales son: (i) pandeo, (ii) aplastamiento de los paneles externos y (iii) delaminación, como se observa en la Figura 79.

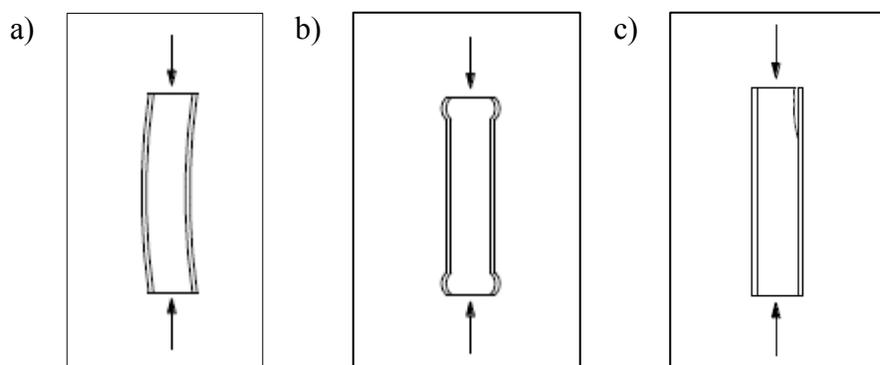


Figura 79 Fallas típicas por carga axial de compresión a) pandeo y b) aplastamiento de paneles externos y c) delaminación

Fuente: (Rungthonkit (2012))

Durante la fase de experimentación se identificó la falla de las muestras por aplastamiento de los paneles externos, calculándose así el módulo de ruptura (*MOR*) de los tableros. También se identificó la falla por delaminación después de alcanzar el *MOR*, por lo cual en la siguiente sección se hallará únicamente la carga crítica por pandeo (ver Figura 79 (a)).

6.1.1. Carga crítica por pandeo

El método analítico descrito por Davies (2008), para determinar la carga crítica por pandeo de un tablero tipo sándwich sujeto a una carga de compresión axial, se fundamenta en la Ecuación 20.

$$P_E = \pi^2 D / L^2 \quad (20)$$

donde P_E es la carga crítica de Euler en kg, L es la altura efectiva en cm y D es la suma de la rigidez flexural (Davies, 2008), dada por la Ecuación 21.

$$D = MOE_F \frac{Bf^3}{6} + MOE_F \frac{Bfe^2}{2} + MOE_C \frac{Bd_c^3}{12} \quad (21)$$

donde MOE_F es el módulo de elasticidad de los paneles externos en kg/cm^2 , MOE_C es el módulo de elasticidad del panel de núcleo en kg/cm^2 , B es el ancho del espécimen en cm, f es el espesor de panel externo en cm, d_c es el espesor del panel de núcleo en cm, e es la distancia entre centroides de los paneles externos en cm; parámetros que pueden ser visualizados en la Figura 80.

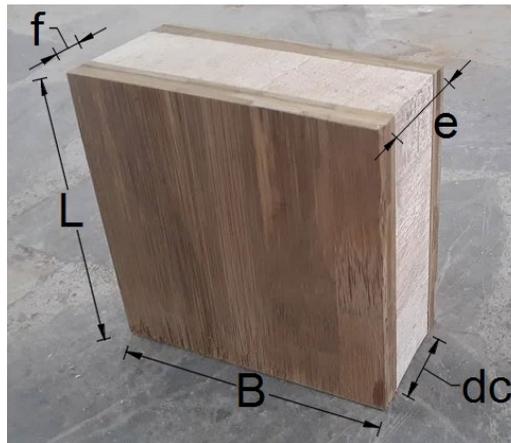


Figura 80 Parámetros de la Ecuación de carga crítica por pandeo

La determinación de la carga crítica por pandeo es necesaria debido a que los tableros estructurales tipo sándwich serán utilizados como elementos sometidos a carga uniaxial. Durante los ensayos experimentales solo se observó una falla por aplastamiento en las caras externas debido

a que la longitud efectiva de las muestras no era suficiente para producir pandeo, por esta razón la determinación de esta carga admisible de pandeo se la debe determinar en tableros del tamaño real que se utilizará en construcción, a partir del módulo de ruptura hallada en las muestras sometidas a cargas de compresión.

En la Figura 81 se identifica la muestra de tablero estructural tipo sándwich utilizada para la determinación del MOR en el laboratorio con sus respectivas dimensiones, la cual se la identifica como 1 y el tablero estructural tipo sándwich de tamaño real, con sus respectivas dimensiones se lo identifica como 2.

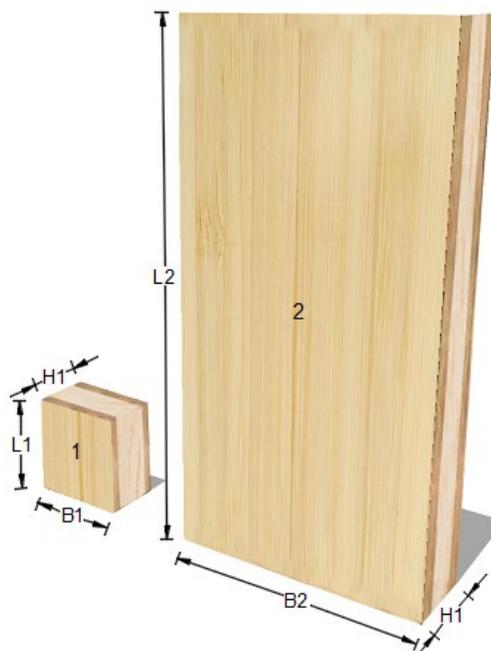


Figura 81 Elementos utilizados para el cálculo de carga axial admisible (1) muestra ensayada experimentalmente y (2) tablero estructural tipo sándwich estándar

El análisis comienza al establecer la ecuación de carga crítica de pandeo para cada elemento, obteniéndose las Ecuaciones 22 y 23:

$$P_{E1} = \pi^2 D_1 / L_1^2 \quad (22)$$

$$P_{E2} = \pi^2 D_2 / L_2^2 \quad (23)$$

En la fórmula de la carga crítica de Euler de cada elemento se reemplaza la rigidez flexural D y se obtienen las Ecuaciones 24 y 25. El módulo de elasticidad de los paneles externos de bambú E_F y del panel de núcleo de balsa, son constantes para los dos elementos E_C .

$$P_{E1} = \frac{\pi^2}{L_1^2} \left(E_F \frac{B_1 f^3}{6} + E_F \frac{B_1 f e^2}{2} + E_C \frac{B_1 d_c^3}{12} \right) \quad (24)$$

$$P_{E2} = \frac{\pi^2}{L_2^2} \left(E_F \frac{B_2 f^3}{6} + E_F \frac{B_2 f e^2}{2} + E_C \frac{B_2 d_c^3}{12} \right) \quad (25)$$

Se despeja el módulo de elasticidad del panel de núcleo E_C de la Ecuación 24, para obtener la Ecuación 26:

$$\begin{aligned} P_{E1} * \frac{L_1^2}{\pi^2} &= E_F \frac{B_1 f^3}{6} + E_F \frac{B_1 f e^2}{2} + E_C \frac{B_1 d_c^3}{12} \\ E_C \frac{B_1 d_c^3}{12} &= \frac{P_{E1} L_1^2}{\pi^2} - E_F \frac{B_1 f^3}{6} - E_F \frac{B_1 f e^2}{2} \\ E_C &= \frac{12}{B_1 d_c^3} \left(\frac{P_{E1} L_1^2}{\pi^2} - E_F \frac{B_1 f^3}{6} - E_F \frac{B_1 f e^2}{2} \right) \quad (26) \end{aligned}$$

Se reemplaza la Ecuación 26 en la Ecuación 25, se reducen términos semejantes y se llega a la Ecuación 27.

$$\begin{aligned} P_{E2} &= \frac{\pi^2}{L_2^2} \left(E_F \frac{B_2 f^3}{6} + E_F \frac{B_2 f e^2}{2} + \left(\frac{12}{B_1 d_c^3} \left(\frac{P_{E1} L_1^2}{\pi^2} - E_F \frac{B_1 f^3}{6} - E_F \frac{B_1 f e^2}{2} \right) \right) \frac{B_2 d_c^3}{12} \right) \\ P_{E2} &= \frac{B_2 P_{E1} L_1^2}{B_1 L_2^2} \quad (27) \end{aligned}$$

6.2. Carga lateral admisible

En el diseño sísmico de una estructura la predicción de la rigidez lateral de los elementos estructurales como columnas o muros es un aspecto de mucha relevancia. Como ejemplos de esto se puede mencionar que durante el proceso de análisis estructural, diferentes valores de rigidez lateral de los elementos estructurales corresponden a diferentes valores de desplazamientos de la estructura total y así mismo, la rigidez lateral afecta el computo del periodo fundamental de una estructura (Rodríguez, Restrepo, & Torres, 2015).

La rigidez lateral de los prototipos se calculó hallando la fuerza necesaria para desplazar una unidad de longitud del panel (1 cm) aplicando la Ecuación 28 (Mosalam, Hagerman, & Kelly, 2008):

$$K_L = \frac{F}{d} \quad (28)$$

Donde K_L es la rigidez lateral en kg/cm, F es la fuerza aplicada en kg y d es el desplazamiento en cm.

Para obtener los datos necesarios para el cálculo de la rigidez lateral se utilizó el software estructural SAP, por ser el más utilizado alrededor del mundo para el modelamiento de estructuras. La geometría general de los paneles es de 60 cm x 240 cm x el espesor de cada prototipo (ver Figura 82(a)). Los materiales utilizados en la creación de los modelos tienen las mismas propiedades físicas y mecánicas determinadas en la fase de experimentación. Se generó un elemento tipo pared compuesto con las direcciones de las fibras correspondientes a la realidad de los tableros y se aplicó una fuerza F cuya magnitud se varió hasta obtener el desplazamiento de 1cm (ver Figura 82 (b)).

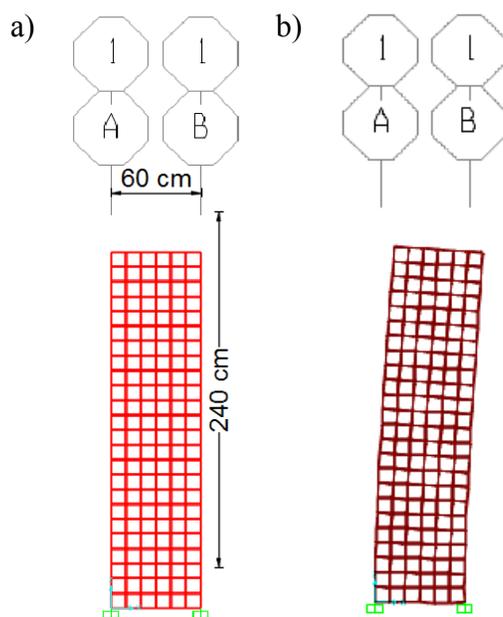


Figura 82 Modelamiento de tableros en SAP a) geometría y b) desplazamiento

Una vez obtenidos los valores de rigidez lateral de cada uno de los prototipos se procedió al cálculo de la carga lateral admisible en base a la ley de Hooke dada por la Ecuación 29 (Ugural, 2008).

$$\sigma = MOE * \varepsilon \quad (29)$$

donde σ es el esfuerzo actuante en MPa , MOE es el módulo de elasticidad del material en MPa y ε es la deformación unitaria.

El esfuerzo actuante se lo define como la fuerza aplicada sobre una determinada área y la deformación se define como la relación entre la variación de la longitud del material con su longitud inicial en la dirección de la aplicación de la fuerza (Ugural, 2008). Reemplazando estas dos definiciones en la Ecuación 29 se obtiene la Ecuación 30:

$$\frac{F}{A} = MOE * \frac{\Delta L}{L} \quad (30)$$

donde F es la fuerza en kg, A es el área en cm^2 , ΔL es la variación de deformación en cm y L es la longitud inicial en la que se producirá la deformación en cm.

De la Ecuación 30 se despeja la fuerza F , quedando la Ecuación 31:

$$F = \frac{MOE * \Delta L * A}{L} \quad (31)$$

La rigidez se expresa como la relación entre el producto del módulo de elasticidad con el área y la longitud inicial del elemento, como indica la Ecuación 32:

$$k = \frac{MOE * A}{L} \quad (32)$$

El área se expresa en función de la fuerza y el esfuerzo quedando la Ecuación 33:

$$k = \frac{MOE * F / \sigma}{L} \quad (33)$$

De la Ecuación 33 se despeja la carga admisible y se obtiene la Ecuación 34:

$$F = \frac{k * \sigma * L}{MOE} \quad (34)$$

La Ecuación 34 será utilizada para determinar la carga lateral admisible de diferentes prototipos de tableros estructurales tipo sándwich en la siguiente sección.

6.3. Proyección de cargas admisibles para diferentes dimensiones de tableros estructurales tipo sándwich

En los capítulos anteriores de la presente investigación se determinó las propiedades físico-mecánicas de dos prototipos de tableros estructurales: el primero con dos paneles externos de 1,7

cm y un panel de núcleo de 8,9 cm y el segundo con dos paneles externos de 1,5 cm y un núcleo de 4,4 cm. A partir de esos resultados y manteniendo el espesor de los paneles externos para no aumentar el peso de los mismos, se calcularon las cargas admisibles axial y lateral para diferentes espesores del panel de núcleo, de esta manera se proporcionará diferentes opciones para ser empleadas de acuerdo a distintas necesidades estructurales.

6.3.1. Cálculo de la carga axial admisible

Para hallar el valor de la carga crítica por pandeo, es necesario establecer la geometría del tablero y sus propiedades mecánicas, las cuales se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32

Datos para el cálculo de la carga axial admisible

DATOS	UNIDAD	ESPÉCIMEN ENSAYADO	PANEL
Ancho del panel (B)	cm	15,00	60,00
Longitud efectiva (L)	cm	15,00	240,00
Espesor (e)	cm	7,40	7,40
Carga crítica (P _E)	kg	20158	

Se aplican los datos de la Tabla 32 en la Ecuación 26.

$$P_{E2} = \frac{60 * 20158 * 15^2}{15 * 240^2}$$

$$P_{E2} = 314,97 \text{ kg}$$

La carga crítica hallada es para un panel de 60 cm de ancho, sin embargo, es necesario obtener un valor por metro lineal, así que como paso final se divide la carga calculada para 0,60 m.

$$P_{cr} = \frac{314,97 \text{ kg}}{0,60 \text{ m}}$$

$$P_{cr} = 524,95 \text{ kg/m}$$

6.3.2. Cálculo de la carga lateral admisible

Para el cálculo de la carga lateral admisible se debe tener los datos presentados en la Tabla 33.

Tabla 33

Datos para el cálculo de la carga lateral admisible

DATOS		VALOR	UNIDAD
Esfuerzo de compresión	(σ)	42,60	MPa
Longitud de deformación	(L)	60,00	cm
Módulo de Elasticidad	(E)	15407,60	MPa
Rigidez lateral	(k)	1545,45	kg/cm ²

Los datos de la Tabla 33 son reemplazados en la Ecuación 33 (carga lateral admisible), quedando de la siguiente manera:

$$F = \frac{1545,45 \text{ kg/cm}^2 * 42,60 \text{ MPa} * 60 \text{ cm}}{15407,60 \text{ MPa}}$$

$$F = 256,38 \text{ kg}$$

La carga lateral hallada es de un tablero de 60 cm de ancho, por lo cual, para hallar la carga admisible por metro lineal se debe dividir para 0,60 m.

$$F = \frac{256,38 \text{ kg}}{0,60 \text{ cm}}$$

$$F = 427,30 \text{ kg/cm}$$

6.3.3. Resumen de propiedades de prototipos de tableros estructurales tipo sándwich de diferentes espesores

Con el proceso de cálculo descrito en la sección 6.3.1 y 6.3.2 se realizó la Tabla 34 y Tabla 35, donde se proyectan los resultados de carga axial, carga lateral admisible, peso e índices de comportamiento mecánico de tableros estructurales de diferentes espesores, con la finalidad de

presentar una amplia gama de utilización, es decir, no solamente prototipo 1 y prototipo 2, sino tableros estructurales conformados de paneles externos de 1,7 cm y 1,5 cm de espesor y un panel de núcleo de balsa cuyo espesor varía desde 1 pulgada (2,54 cm) hasta 3,5 pulgadas (8,9 cm). El espesor de los paneles externos se mantiene constante en cada tabla para no aumentar considerablemente su peso y mantener densidades por debajo de los 500 kg/ m³.

Tabla 34

Propiedades de los tableros estructurales tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,7 cm

ESPESOR NÚCLEO	ESPESOR TOTAL	CARGA AXIAL ADMISIBLE	CARGA LATERAL ADMISIBLE	PESO	PI ₁	PI ₂
cm	cm	kg/m	Kg/m	kg/m	(GPa ^{1/3} m ³)/Mg	(MPa ^{1/2} m ³)/Mg
2,54	5,94	453,16	319,28	59,81	6,66	17,12
3,81	7,21	615,02	402,36	72,60	6,76	17,72
4,40	7,80	696,46	444,67	78,54	6,80	18,01
5,08	8,48	795,15	496,74	85,39	6,85	18,36
6,35	9,75	993,45	604,88	98,17	6,94	19,04
7,62	11,02	1209,96	730,03	110,96	7,03	19,78
8,90	12,43	1446,61	886,43	125,16	7,12	20,59

Tabla 35

Propiedades de los tableros estructurales tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,5 cm

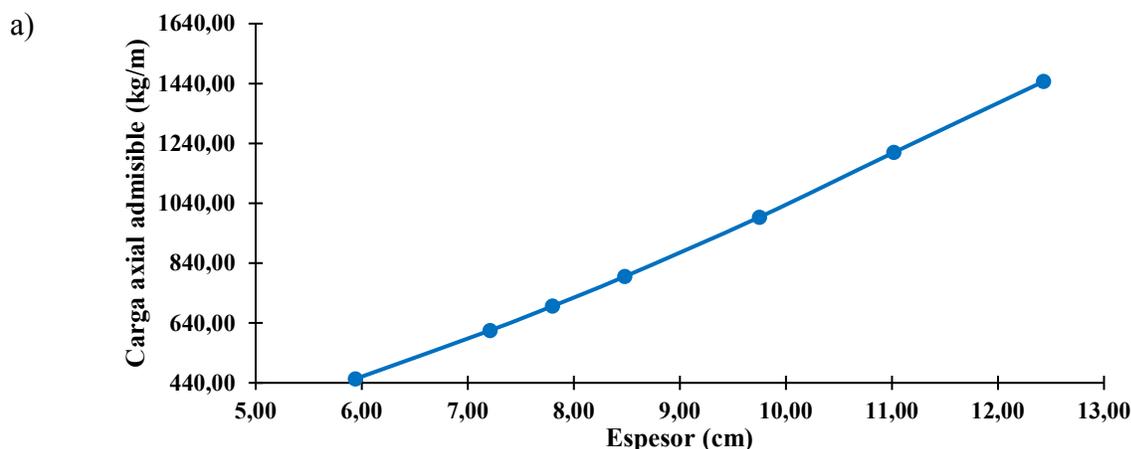
ESPESOR NÚCLEO	ESPESOR TOTAL	CARGA AXIAL ADMISIBLE	CARGA LATERAL ADMISIBLE	PESO	PI ₁	PI ₂
cm	cm	kg/m	Kg/m	kg/m	(GPa ^{1/3} m ³)/Mg	(MPa ^{1/2} m ³)/Mg
2,54	5,54	328,92	277,42	55,78	6,35	16,24
3,81	6,81	458,51	377,40	68,57	6,44	16,74
4,40	7,40	524,95	427,30	74,51	6,48	16,99
5,08	8,08	606,36	488,09	81,36	6,52	17,28
6,35	9,35	772,39	611,74	94,15	6,61	17,85
7,62	10,62	956,64	750,60	106,93	6,71	18,46
8,90	11,90	1160,76	908,99	119,82	6,80	19,12

De acuerdo a la Tabla 34 la carga axial admisible de acuerdo al espesor varía entre 453,16 kg/m y 1446,61 kg/m, la carga lateral admisible está en un rango de 319,28 kg/m y 886,43 kg/m,

el peso de los tableros va desde 59,81 kg/m hasta 125,16 kg/m, el índice de comportamiento mecánico PI_1 varía entre 6,66 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y 7,12 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y PI_2 entre 17,12 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y 20,59 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg.

La Tabla 35 indica que la carga axial admisible de acuerdo al espesor varía entre 328,92 kg/m y 1160,76 kg/m, la carga lateral admisible está en un rango de 277,42 kg/m y 908,99 kg/m, el peso de los tableros va desde 55,78 kg/m hasta 119,82 kg/m. , el índice de comportamiento mecánico PI_1 varía entre 6,35 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y 6,80 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y PI_2 entre 16,24 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg y 19,12 ($\text{GPa}^{1/3} \text{ m}^3$)/Mg.

La Figura 83 y Figura 84 presentan los datos de la Tablas 35 y 36 relacionando la carga axial y lateral admisible con su respectivo espesor, para facilitar su selección, según el método de diseño por esfuerzos admisibles, de acuerdo a las diferentes necesidades de cada estructura dependiendo de la región, condiciones climáticas, zona de riesgo sísmico y condiciones de carga.



CONTINÚA 

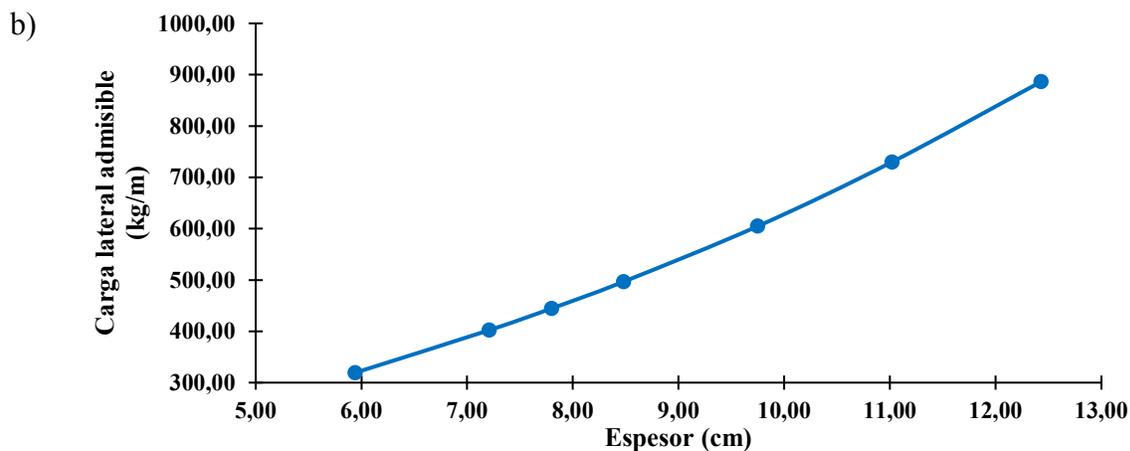


Figura 83 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,7 cm de espesor a) carga axial admisible vs espesor total y b) carga lateral admisible vs espesor total

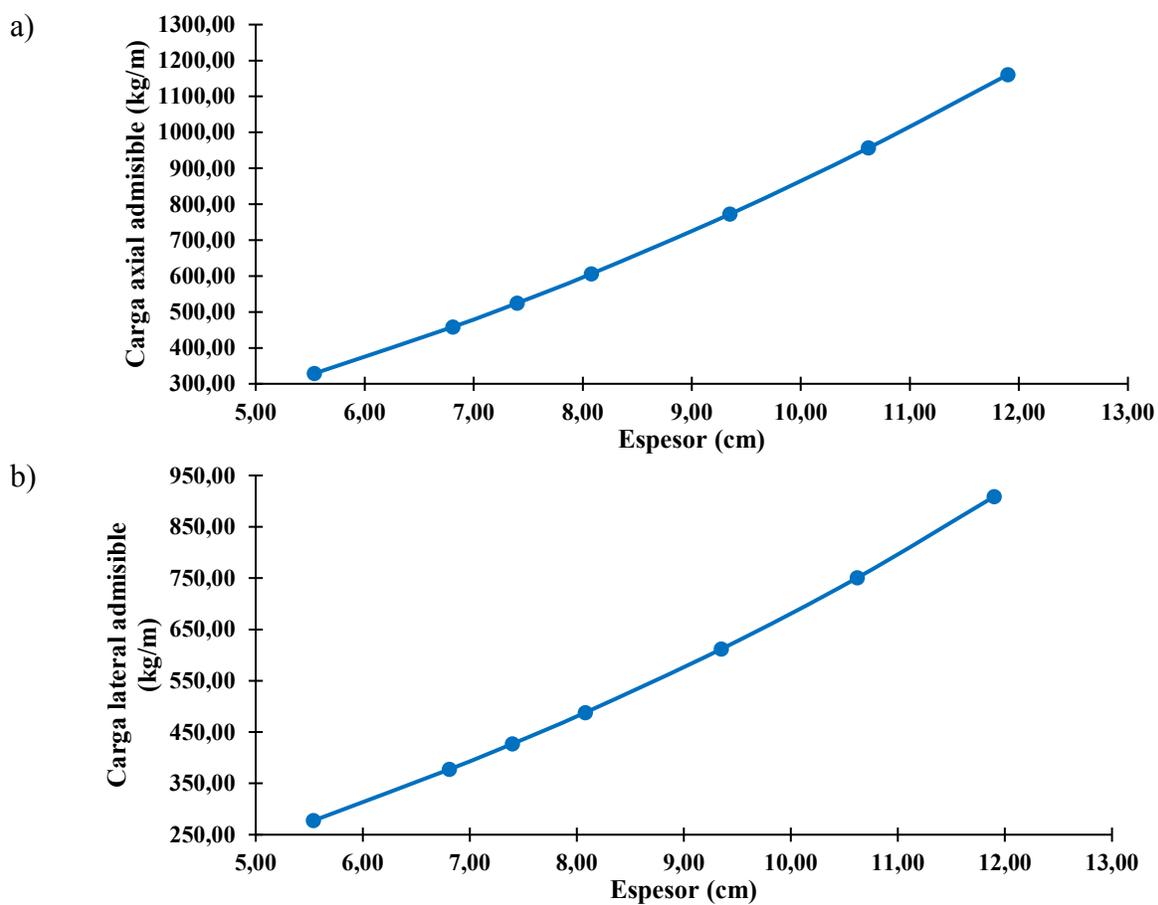


Figura 84 Datos de prototipos de tablero estructural tipo sándwich con paneles externos de bambú de 1,5 cm de espesor a) carga axial admisible vs espesor total y b) carga lateral admisible vs espesor total

6.4. Costo referencial

La Tabla 36 y Tabla 37 presentadas a continuación, describen el costo de producción por metro cuadrado de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich con cada uno de sus componentes. Los datos fueron proporcionados por las empresas CENBA y Plantabal S.A.

Tabla 36

Costo referencial por metro cuadrado del prototipo 1

ITEM	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES			COSTO UNITARIO (\$/m ²)	COSTO TOTAL (\$/m ²)
		Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)		
1	Panel de bambú	1,00	1,00	0,017	40,16	40,16
2	Panel de balsa	1,00	1,00	0,089	42,72	42,72
3	Costo de unión (\$/m ³)				50,00	4,02
TOTAL						86,90

Tabla 37

Costo referencial por metro cuadrado del prototipo 2

ITEM	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES			COSTO UNITARIO (\$/m ²)	COSTO TOTAL (\$/m ²)
		Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)		
1	Panel de bambú	1,00	1,00	0,015	35,44	35,44
2	Panel de balsa	1,00	1,00	0,044	21,12	21,12
3	Costo de unión (\$/m ³)				50,00	6,76
TOTAL						63,32

De acuerdo a la Tabla 36 el costo por metro cuadrado de tablero estructural tipo sándwich prototipo 1 es 86,90 \$/m² y de acuerdo a la Tabla 37 el prototipo 2 tiene un costo de 63,32 \$/m². Se debe considerar que el costo referencial de los prototipos puede ser reducido en un 10 % con una producción descentralizada, aumento de los factores de oferta y demanda y mejorando las prácticas de producción y tecnología; obteniéndose costos de 78,21 \$/m² y 56,88 \$/m², respectivamente para cada prototipo.

6.5. Comparación con materiales convencionales

6.6.1. Peso

Cualquier estructura diseñada inteligente y responsablemente aspira a ser “tan liviana como sea posible”. La selección de materiales de construcción es un aspecto que afecta directamente al peso muerto de la estructura y la carga viva que va a soportar, mientras menor sea la relación entre el peso muerto y las cargas vivas soportadas, más liviana será la edificación (Schlaich & Schlaich, 2000).

Las edificaciones “pesadas” son las más construidas y se las denominan así por estar conformadas con materiales como el hormigón, ladrillo y acero, debido a que estos materiales tienen altas densidades: 2400 kg/m^3 , 2000 kg/m^3 y 7850 kg/m^3 , respectivamente. Sin embargo, la arquitectura e ingeniería civil actual se basa cada vez más en aspectos modernos de huella ambiental y eficiencia energética, la cual necesariamente requiere construcciones livianas en las edificaciones futuras. Existe un gran potencial en el campo del diseño de estructuras livianas, pues estas minimizan el consumo de materiales de construcción, por lo tanto minimizan la energía fósil producida en su fabricación y además proponen la utilización de materiales renovables (Heine & Heine, 2014).

Para realizar una comparación significativa entre los tableros propuestos y la mampostería tradicional, se elaboraron dos paredes de bloque sin enlucir cuyas medidas nominales son de 64 cm x 64 cm x 15 cm, como se puede observar en la Figura 85.



Figura 85 Paredes de bloque elaboradas

Se determinó la densidad de las dos paredes de bloque con la medición de sus dimensiones y su peso, aplicando la Ecuación 34.

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (35)$$

donde ρ es la densidad en kg/m^3 , W es el peso de la pared y V el volumen de la misma. Los valores de densidad se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38

Densidad de paredes de bloque

	LARGO (m)	ANCHO (m)	ESPESOR (m)	VOLUMEN (m ³)	PESO (kg)	DENSIDAD (kg/m ³)
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

Al ser similares los valores de las densidades, se utilizará su valor promedio de 1154,97 kg/m^3 para realizar la comparación de su peso por metro cuadrado con el de los tableros estructurales tipo sándwich, esta comparación se presenta en la Tabla 39.

Tabla 39

Comparación de pesos por metro cuadrado

ELEMENTO	ESPESOR (m)	VOLUMEN (m ³)	DENSIDAD (kg/m ³)	PESO (kg/m ²)
Prototipo 1	0,07	0,07	307,43	51,46
Prototipo 2	0,12	0,12	413,97	22,75
Pared de bloque	0,15	0,15	1154,97	173,25

Con el peso por metro cuadrado calculado de la pared de bloque y de los prototipos, se puede concluir que el prototipo 1 y el prototipo 2 son 3,37 y 7,61 veces más livianos que la pared de bloque. Un menor peso implica que una edificación construida en base a tableros estructurales tipo sándwich tendrá los siguientes beneficios: menores cargas sísmicas, menores dimensiones de cimentaciones, disminución del tiempo de construcción y menor huella ambiental.

6.6.2. Resistencia

El objetivo principal de la presente investigación es proponer los tableros estructurales tipo sándwich compuestos de paneles externos de bambú y un panel de núcleo de balsa como alternativa de mampostería tradicional, por esta razón la principal comparación en términos de resistencia se realizó con bloques de cemento y ladrillos. La Tabla 40 muestra los datos de resistencia de las diferentes clases de bloques de cemento de acuerdo a la norma *INEN 3066: Bloques de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*, y la Tabla 41 presenta la resistencia de acuerdo al tipo de ladrillo acorde con la norma *INEN 297: Ladrillos cerámicos. Requisitos*.

Tabla 40

Resistencia neta mínima a la compresión, en bloques

DESCRIPCIÓN	RESISTENCIA NETA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)		
	Clase A	Clase B	Clase C
Promedio 3 bloques	13,8	4,1	1,7
Por bloque	12,0	3,5	1,4

Tabla 41

Requisitos de resistencia mecánica y absorción de la humedad que deben cumplir los ladrillos cerámicos

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	16
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

De acuerdo a los resultados del capítulo 4 con respecto al módulo de ruptura del prototipo 1 y prototipo 2 se obtuvieron valores compensados de 37,81 MPa y 42,60 MPa, respectivamente. Al compararlos con la resistencia de bloques de cemento clase A se obtiene que el prototipo 1 es 2,73 veces más resistente y a comparación con el ladrillo macizo tipo A es 1,51 veces mayor. Con

respecto al prototipo 2 es 3,08 y 1,70 veces más resistente que el bloque de cemento clase A y que el ladrillo macizo tipo A, respectivamente. Se debe considerar que en el Ecuador los bloques de cemento no cumplen a cabalidad con los requisitos de resistencia expuestos en la normativa, llegando a tener valores promedio de resistencia hasta de 6 MPa, de acuerdo al estudio realizado por Mejia and Pachacama (2018), lo que implica que el prototipo 1 y prototipo 2 tienen una mayor resistencia a la compresión de hasta 6,3 y 7,1 veces, respectivamente y a su vez, son capaces de resistir esfuerzos de flexión, corte y tracción, características que el ladrillo y el bloque no poseen.

6.6.3. Impacto ambiental

La industria de la construcción es la mayor consumidora de recursos naturales, las obras civiles y la construcción de edificios consumen el 60% de materia prima extraída de la litosfera, aparte de contribuir con más del 40% de las emisiones de CO₂ y son las responsables de consumir una gran parte de energía producida (Yüksek, 2015).

La comparación del impacto ambiental que tienen los materiales convencionales (hormigón, acero, bloque y ladrillo) con respecto a los tableros estructurales tipo sándwich estudiados, se realizó a través de uno de los indicadores de impacto ambiental más relevantes, el consumo energético derivado de su ciclo de vida.

Sabnis and Pranesh (2017), calcularon la energía incorporada de varios materiales de construcción, en su estudio sobre la evaluación de materiales de construcción para la edificación sostenible basada en figura del mérito como concepto. Algunos de los valores hallados se presentan en la Tabla 42, donde se puede identificar que el material más contaminante es el aluminio con una energía incorporada de 218 MJ/kg y el acero es el segundo más contaminante con 35,09 MJ/kg. La madera y el bambú son los que menor energía incorporada tienen, con valores de 1,00 MJ/kg y 0,50 MJ/kg, respectivamente.

Tabla 42
Valores de energía incorporada de varios materiales

MATERIAL	DENSIDAD kg/m³	ENERGÍA INCORPORADA MJ/kg
Aluminio	2700,00	218,00
Acero	7850,00	35,09
Ladrillo	2000,00	3,31
Concreto	2400,00	1,31
Madera	940,00	1,00
Bambú	600,00	0,50

Fuente: (Sabnis and Pranesh (2017)).

La Tabla 42 verifica que el bambú y la madera son materiales menos contaminantes que el aluminio y el acero, sin embargo, al compararse con el concreto y el ladrillo se obtienen valores no muy distantes. Pero sobre esto, la investigación realizada por Janssen (1981), sobre el bambú en la construcción de estructuras, demuestra que al aumentar el parámetro de resistencia del material al análisis anterior, es decir, relacionar la energía necesaria para la producción de un material de construcción con su resistencia, se obtiene que el hormigón tiene 8 veces más costo energético que el bambú y 3 veces más que la madera; el acero tiene un costo energético de 50 veces más que el bambú y alrededor de 18 veces más que la madera, en términos de energía incorporada por metro cúbico por unidad de esfuerzo ($\text{MJ/m}^3 \cdot \text{N/mm}^2$), como se puede ver en la Figura 86.

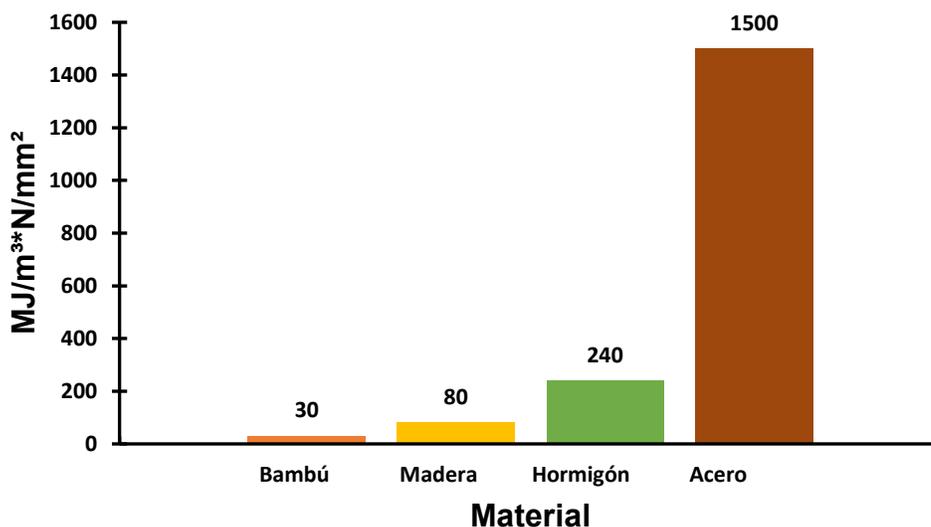


Figura 86 Gráfica de la tasa de energía para la producción de materiales de construcción
Fuente: (Janssen (1981))

Los tableros estructurales tipo sándwich compuestos de paneles externos de bambú y un panel de núcleo de balsa, representan la mejor alternativa a los materiales convencionales no solamente por sus características de resistencia y peso, como se ha indicado en los puntos anteriores, sino por ser materiales que, si bien requieren el uso de energía para su procesamiento y transporte, siguen siendo bajos en términos de energía incorporada, contaminación y emisiones de CO₂. Adicionalmente, los prototipos de tablero estructural tipo sándwich propuestos cumplen con requisitos ambientales y de ingeniería como son: sostenibilidad, comportamiento mecánico óptimo, menores costos y tiempo de construcción, durabilidad, peso ligero, disponibilidad y fácil transporte y montaje.

6.6.4. Costo

Para realizar una comparación de costo de los prototipos de tablero estructural tipo sándwich propuestos con materiales convencionales se elaboró la Figura 87, donde se presenta el precio por metro cuadrado, de acuerdo a los rubros referenciales de la Cámara de la Industria de la

Construcción (CAMICON, 2018), con respecto a mampostería de ladrillo mampón, bloque liviano y pesado, Gypsum y de tableros MDF.

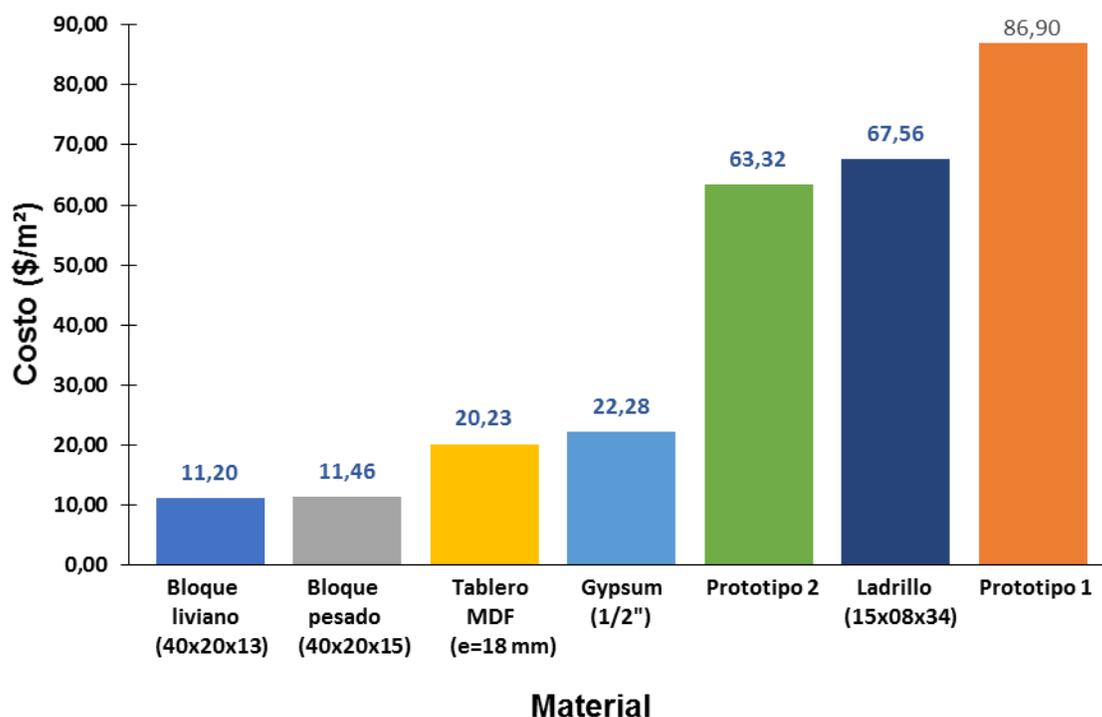


Figura 87 Costo por metro cuadrado de materiales convencionales y prototipos propuestos

El prototipo 1 es más costoso que los materiales convencionales indicados y el prototipo 2 solo es más barato que la mampostería de ladrillo mampón. El aumento de precio con respecto a los materiales convencionales de mampostería, paredes de Gypsum y tableros MDF es justificable, ya que los tableros tipo sándwich propuestos están dirigidos a ser utilizados como elementos estructurales, debido a sus cualidades de resistencia a esfuerzos de compresión, flexión, tracción y corte. Además, se debe tomar en cuenta que dentro de la comparación de costos no se considera el ahorro total en la edificación, ya que, al ser materiales prefabricados y livianos, producen un menor costo de la cimentación y disminución del tiempo de construcción.

Usualmente los materiales de construcción son comparados y seleccionados en base a requerimientos funcionales, técnicos y financieros, siendo el último la consideración principal. El costo de un material en el mercado solo incluye costos de fabricación y transporte, mas no se consideran los costos sociales y ambientales. Al tomar en cuenta este factor de análisis a través del eco-costo, el cual calcula el costo de prevención por daño al medio ambiente, es decir, el costo de la contaminación ambiental o agotamiento del material, se puede cuantificar la relación entre economía y ecología de los materiales comparados.

La Figura 88 presenta los valores de eco-costo durante el ciclo de vida de varios materiales en dólares por metro cúbico de material, mismos fueron obtenidos de (IDEMAT, 2015; Vogtlander & Van der Lugt, 2014). Se identifica que el bloque de cemento, ladrillo y el tablero MDF son los que tienen un mayor eco-costo de 34,71 \$/m³, 50,58 \$/m³ y 40,53 \$/m³, respectivamente. El gypsum es el que tiene el menor eco-costo de entre los materiales convencionales mencionados con un valor de 0,06 \$/m³. Por otro lado, se identifica que los laminados de bambú y madera tipo softwood son los materiales de menor eco-costo con valores de 10,35 \$/m³ y 74,75 \$/m³, respectivamente al final de su ciclo de vida.

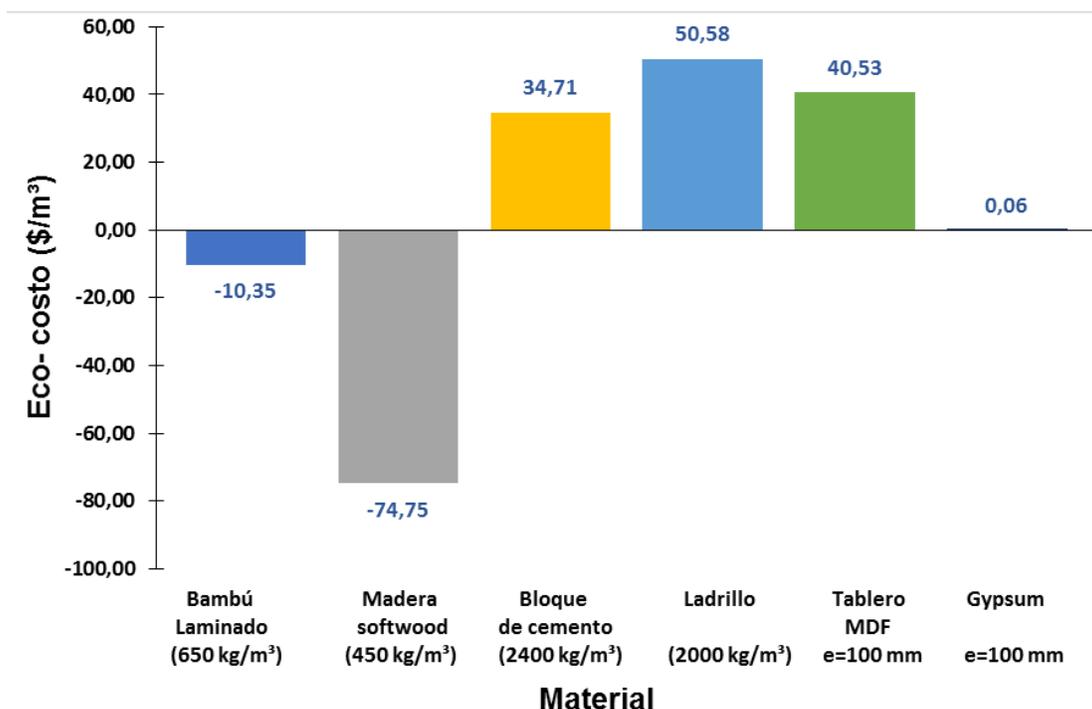


Figura 88 Eco-costo durante el ciclo de vida para varios materiales de construcción
Fuente: (Vogtlander and Van der Lugt (2014))

Los tableros estructurales tipo sándwich como material compuesto tienen un eco-costo total de -85,10 \$/m³, valor que es 1,4 veces menor que el de bloque de cemento, 1,5 veces menor al ladrillo, 1,47 veces menor al tablero MDF y 1,06 veces menor que el gypsum.

Los valores del eco-costo no son incluidos dentro del precio de venta de un material, pero son cobrados al medio ambiente, en la contaminación por residuos no degradables y gases contaminantes que afectan directamente al ser humano, animales y plantas. Por consiguiente, al considerar el desempeño económico y ambiental de los materiales comparados, los tableros estructurales tipo sándwich propuestos proveen la mejor solución estructural con el menor costo total por unidad funcional.

CAPÍTULO VII

ESTUDIOS FUTUROS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Potenciales aplicaciones

Los resultados de propiedades mecánicas obtenidos en el Capítulo 4 ratifican la utilización de los tableros estructurales propuestos como una alternativa factible a las actuales mamposterías tradicionales existentes en el mercado; sin embargo, sus propiedades sobresalientes en cuanto a ligereza, resistencia a esfuerzos, eficiencia mecánica e impacto ambiental positivo los permite clasificar dentro de un sistema constructivo formado únicamente por paneles (ver Figura 89), conocido como paneles estructurales aislados (SIP, por sus siglas en inglés). Este sistema estructural es comúnmente utilizado en Estados Unidos de Norte América, Canadá, Australia e Inglaterra, donde los tableros estructurales están conformados típicamente por tableros externos de fibra orientada (OSB) o plywood y un panel de núcleo de espuma de poliuretano y se utilizan principalmente en la construcción de edificios residenciales, casas, escuelas y hospitales, entre otros (Rungthonkit, 2012).



Figura 89 Sistema constructivo de paneles estructurales aislados

Fuente: (Rungthonkit (2012))

Por otro lado, la fundamentación teórica y principios mecánicos de las estructuras tipo sándwich, engineered wood products (EWP) y eficiencia mecánica se pueden aplicar en techos, material de entrepisos y en otras industrias como la industria naval, automotriz y aeronáutica.

7.2. Estudios futuros

Varios estudios son necesarios para entender el comportamiento total de los paneles estructurales tipo sándwich, principalmente por ser los primeros en relacionar paneles externos bidireccionales de bambú y un panel de núcleo de balsa. Las propiedades físico-mecánicas estudiadas en la presente investigación deben ser complementadas con el comportamiento dinámico y la determinación de sus propiedades acústicas, térmicas, de resistencia contra agentes biológicos (hongos e insectos) y abióticos (cambios de temperatura, presencia de agua, fuego, entre otros).

7.2.1. Resistencia térmica

Al enfrentar la tendencia del calentamiento global, existe una gran necesidad de tener medidas efectivas para mantener temperaturas cómodas dentro de una infraestructura, es decir, mantener una temperatura interior independiente de las fluctuaciones de la temperatura exterior. Para proporcionar una protección adecuada contra los cambios severos de temperatura, los materiales deben tener buenas propiedades de conductividad térmica, mantenimiento de calor (menor difusión térmica) y resistencia térmica (Kawasaki & Kawai, 2006).

La caracterización de las propiedades térmicas de los tableros estructurales tipo sándwich propuestos, es un paso crucial para su incorporación como alternativa de mampostería convencional y apuntar al aprovechamiento de materiales naturales en el aislamiento térmico. Los productos laminados de bambú presentan una capacidad de menor conductividad térmica a una mayor densidad, más que cualquier otra madera (Shah, Bock, Mulligan, & Ramage, 2016). Por su parte los paneles end-grain de balsa, de acuerdo al estudio realizado por Kotlarewski, Ozarska, and

Gusamo (2014), tienen una conductividad térmica similar a otros materiales actualmente utilizados en la industria de la construcción.

Cada componente de tablero por separado presenta prometedoras características térmicas esenciales para su uso en diseño de edificaciones de bajo consumo energético; sin embargo, es necesario conocer sus propiedades como material compuesto. Se propone el uso de la normativa ASTM D 5334 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, para la determinación de las mismas.

7.2.2. Resistencia acústica

La transmisión de energía acústica en el aire a través de un único elemento de separación depende de varias variables, como la frecuencia del sonido que incide en el elemento, las propiedades físicas del panel (masa, amortiguación interna, módulo de elasticidad, relación de Poisson, entre otros), las conexiones con la estructura circundante y los modos propios de vibración del elemento (Khidir, Harun, Nor, & Razi, 2013).

Las propiedades acústicas de las fibras del bambú son equivalentes a las de la lana de vidrio y el coeficiente de absorción del sonido incrementa con la densidad de las mismas (Koizumi, Tsujiuchi, & Adachi, 2002). Por otro lado, las maderas de baja densidad y porosidad como la balsa, son buenos absorbentes de sonido (Arunkumar, Pitchaimani, Gangadharan, & Lenin Babu, 2017).

La presente investigación se focalizó en el estudio de las propiedades mecánicas de los tableros estructurales tipo sándwich; sin embargo, es necesario conocer cuáles son las propiedades acústicas de los tableros por lo cual, estudios de medición de la absorción del sonido son necesarios para complementar la investigación. Se propone la realización de ensayos de acuerdo a la siguiente normativa: (i) ASTM E90 Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements, (ii) ASTM E413 Classification for Rating Sound Insulation y (iii) ASTM E366 Standard Test Method for Measurement of Airborne Sound Attenuation between Rooms in Buildings.

7.2.3. Resistencia contra agentes biológicos y abióticos

Los tableros estructurales tipo sándwich investigados al ser compuestos por materiales naturales como el bambú y la balsa, tienden a degradarse en un determinado tiempo sin un tratamiento adecuado, requieren un recubrimiento especial y en el caso del bambú preservantes antes de ser secado. Se debe tomar en cuenta que al ser elementos estructurales deben ser durables y esto depende en gran medida de su inherente resistencia al ataque de insectos y hongos. Adicionalmente, es necesario conocer acerca su permeabilidad, resistencia a cambios de temperatura, fuego y presencia de luz solar (Findlay, 2013).

En el mercado existen una gama de tratamientos químicos para mejorar la vida útil de la madera, los mismos que se impregnan en las células haciéndolas resistentes a los factores anteriormente mencionados, como son sales de boro, CCA (Sales de cobre, cromo y arsénico), LOSP (Preservativo ligero a base de solventes orgánicos), por mencionar algunos.

El estudio de las propiedades contra agentes biológicos y abióticos es necesario para complementar la presente investigación, al igual que el ensayo de los diferentes preservantes, para así hallar el que proporcione resultados óptimos en los aspectos económicos, ambientales y estructurales para los tableros tipo sándwich.

7.2.4. Comportamiento ante esfuerzos dinámicos y capacidad de absorción de energía

Dos son los típicos casos de cargas dinámicas que afectan a una edificación: (i) viento y (ii) sismos. Su distribución sobre la altura de la edificación es de alguna manera similar, sin embargo, sus efectos sobre la estructura y sus consecuencias son diferentes. Las fuerzas de viento aplican una presión en el lado de barlovento y succión en el de sotavento. Las fuerzas sísmicas, por otro lado, afectan a la edificación proporcionalmente a la distribución de su masa sobre el plano del piso y su altura, así como la distribución de la rigidez de los elementos de arriostramiento horizontal. Para la mayoría de las edificaciones en zonas sísmicamente activas la más problemática de las dos

es la segunda, ya que esta somete a la estructura a una carga dinámica de alta intensidad que a menudo resulta en consecuencias catastróficas (Ber, Premrov, Sustersic, & Dujic, 2013).

Actualmente, cuando se desea conocer acerca de la capacidad sísmica de una estructura o componente estructural, hay tres enfoques para obtener esta información experimentalmente: (i) ensayos cuasi-estáticos, (ii) ensayos en mesas vibratorias y (iii) ensayos pseudo-dinámicos, dentro de estos ensayos se encuentra el análisis de disipación de energía con las gráficas de carga-desplazamiento de un espécimen bajo cargas cíclicas (Mosalam et al., 2008). El entendimiento del comportamiento sísmico de los tableros estructurales tipo sándwich propuestos es un aspecto importante dentro del presente estudio. Ensayos experimentales de este sistema estructural son vitales no solamente para su investigación y desarrollo, sino para la recopilación de información sobre el comportamiento dinámico para la realización de un diseño sismorresistente adecuado.

7.3. Conclusiones

Los hallazgos más importantes de la presente investigación se detallan a continuación:

1. El análisis de factibilidad mostró la importancia de implementar prácticas de construcción con biomateriales como bambú y balsa, debido a su impacto ambiental positivo en términos de emisiones de CO₂, amplia disponibilidad y energía incorporada durante su ciclo de vida; lo cual apoya la idea de que una buena selección de materiales de construcción se debe enfocar en el adecuado comportamiento mecánico-estructural y en el análisis de su ciclo de vida, tomando en cuenta el costo social, ambiental y económico.
2. El comportamiento mecánico-estructural experimental, numérico y analítico determinado de los tableros estructurales tipo sándwich, no solamente satisfacen los requerimientos para ser utilizados como alternativa de mampostería, sino que su resistencia bajo cargas de compresión es hasta 6 y 7 veces superior que la del bloque y del ladrillo, respectivamente; además, los tableros propuestos tienen la capacidad de resistir esfuerzos de flexión, tracción y corte, características que los materiales convencionales de mampostería no poseen.

3. El comportamiento altamente dúctil identificado en los ensayos de compresión y flexión, tanto para el prototipo 1 como para el prototipo 2, indican la capacidad del material para sufrir deformaciones significativas. Técnicamente esto significa que la edificación seguirá resistiendo carga aún después de que los tableros funcionen en el rango plástico, permitiendo la evacuación segura de las personas que se encuentren en su interior; justificando así su utilización en regiones de alto riesgo sísmico.

4. Los prototipos propuestos presentan un costo más elevado que la mayoría de materiales convencionales, sin embargo, su costo-beneficio justifica este incremento de precio, a razón de tener mejores características mecánicas y ecológicas, como son: eco-costo hasta 1,5 veces menor que los materiales convencionales, eficiencia mecánica 5 veces mayor que hormigón, con un peso hasta 7,61 veces menor que una pared de bloque y un costo energético 50 veces inferior que el acero.

5. La implementación de los tableros estructurales tipo sándwich compuestos de paneles externos de bambú y un núcleo ligero de balsa, proporcionará ventajas en términos de un comportamiento óptimo estructural, diseño sismorresistente, menor tiempo de construcción, edificación más liviana, sostenibilidad, mayor durabilidad, menor energía incorporada y menores emisiones de gases contaminantes.

7.4. Recomendaciones

1. Los estudios futuros propuestos en este Capítulo son esenciales para complementar la investigación de las propiedades de los tableros estructurales tipo sándwich, a fin de lograr en el corto plazo la obtención de sus respectivas patentes para su utilización en la industria de la construcción.

2. Estudiar las propiedades mecánicas de los tableros con un panel de núcleo con defectos; para así, poder reducir el costo total del tablero y aprovechar paneles de balsa de menor calidad producidos en Plantabal S.A.

3. Promover la utilización responsable de elementos estructurales hechos a base de madera, como son los tableros estructurales estudiados en proyectos de construcción y rehabilitación de edificaciones en las zonas afectadas por eventos sísmicos.

4. Adaptar la normativa existente con respecto a estructuras de madera y bambú, de acuerdo a las nuevas soluciones estructurales hechas en base a biomateriales como los engineered wood products y los tableros propuestos en la presente investigación.

7.5. Referencias bibliográficas

- Acevedo, C. (2014). *A Comparative Life Cycle Assessment Of A Social Interest Housing Building: Bamboo Vs. Concrete*. (M.A., Design), Cornell University Ithaca, New York Retrieved from <https://hdl.handle.net/1813/38972>
- Allen, H. G. (2013). *Analysis and design of structural sandwich panels the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division* (First edition ed.). Southampton: Pergamon Press.
- Añazco, M., & Rojas, S. (2015). Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie *Guadua angustifolia*. Retrieved from <https://bambuecuador.files.wordpress.com/2018/01/2015-estudio-de-la-cadena-desde-la-produccioe81n-al-consumo-del-bambuce81-en-perucc81.pdf>
- Apetre, N., Sankar, B., & Ambur, D. (2008). Analytical modeling of sandwich beams with functionally graded core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 10(1), 53-74. doi:<https://doi.org/10.1177/1099636207081111>
- Archila, H. A., Brandon, D., Ansell, M., Walker, P., & Ormondroyd, G. (2015). *Evaluation of the mechanical properties of cross laminated bamboo panels by digital image correlation and finite element modelling*. Paper presented at the World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014, Quebec.
- Armendáriz, C., Vinicio, F., Álvarez, T., & Aníbal, J. (2011). *Cálculo y diseño estructural para la cubierta del Mercado Central de la Parroquia de Píntag en base a tenso-estructuras con el uso de bambú gigante (dentrocalamus asper)*. (Ingeniería Civil), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/3175>

- Arunkumar, M., Pitchaimani, J., Gangadharan, K., & Lenin Babu, M. (2017). Sound transmission loss characteristics of sandwich aircraft panels: Influence of nature of core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(1), 26-48. doi:<https://doi.org/10.1177/1099636216652580>
- Ashby, M. F. (2005). *Materials selection in mechanical design* (Third edition. ed.). Amsterdam: Pergamon Press.
- Bahtiar, E., Nugroho, N., & Surjokusumo, S. (2010). Estimating Young's modulus and modulus of rupture of coconut logs using reconstruction method. *Civil Engineering Dimension*, 12(2), 65-72. doi:<https://doi.org/10.9744/ced.12.2.65-72>
- Ber, B., Premrov, M., Sustersic, I., & Dujic, B. (2013). Innovative earthquake resistant timber-glass buildings. *Natural Science*, 5(08), 63-75. doi:<http://dx.doi.org/10.4236/ns.2013.58A1008>
- Bonet, X., Coello, J., & Andrade, H. (2009). General aspects about balsa wood as core material for sandwich construction frp. Retrieved from <http://www.balsaflex.com/images/documents/balsaflex/Balsa-Book.pdf>
- Butterfield, B. G., Meylan, B. A., & Peszlen, I. M. (1997). *Three dimensional structure of wood*. Budapest: Syracuse University Press.
- Cai, Z., & Ross, R. J. (2010). *Mechanical properties of wood-based composite materials*. Retrieved from Madison, Wisconsin:
- CAMICON. (2018). Rubros referenciales Septiembre - Octubre 2018. *Revista Construcción N° 259*.
- Castejón, L., Jiménez, M. A., & Miravete, A. (1997). Características de los elementos resistentes tipo sandwich construidos en materiales compuestos avanzados a partir de tejidos tridimensionales. *Materiales de construcción*, 47(247), 73-82. doi:<https://doi.org/10.3989/mc.1997.v47.i247-248.496>
- Construcción, N. E. d. I. (2016). Estructuras de Guadúa, Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, (Vol. NEC-SE-GUADÚA). Ecuador.
- Contreras, M., & Winckler, P. (2013). Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y proyectos*, 14(2), 6-19. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132013000200001>
- Creswell, J. W. (1994). *Research design: Qualitative & quantitative approaches*. Londres,: Sage Publications.
- Da Silva, A., & Kyriakides, S. (2007). Compressive response and failure of balsa wood. *International Journal of Solids and Structures*, 44(25-26). doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.07.003>
- Damico, D. J. (2003). *Reactive acrylic adhesives: Handbook of adhesive technology*. New York: Marcel Dekker, Inc
- Davies, J. (1987). Design criteria for structural sandwich panels. *Structural Engineer. Part A*, 65(12), 435-441.
- Davies, J. (1993). Sandwich panels. *Thin-walled structures*, 16(1-4), 179-198. doi:[https://doi.org/10.1016/0263-8231\(93\)90044-B](https://doi.org/10.1016/0263-8231(93)90044-B)
- Davies, J. (2008). *Lightweight sandwich construction* (First edition ed.). Manchester, UK: Blackell Science.
- De Mena, J. (2015). *Materiales de rápida renovación para construcción*. Retrieved from <http://www.mimbrea.com/materiales-de-rapida-renovacion-para-la-construccion/>

- Espinosa Cazarín, E. F., Terán Gilmore, A., Zúñiga Cuevas, O., & Perilliat, R. J. (2014). Consideraciones para el diseño sísmico de edificios altos de mampostería confinada ubicados en zonas sísmicas. *Ingeniería sísmica*, 90(7), 88-109.
- Findlay, G. (2013). *Preservation of Timber in the Tropics*. Whitchurch, England.: Springer Science & Business Media.
- Fraanje, P. (1998). *Renewable Resources For Building Materials*. Amsterdam: Proefschrift Universiteit van Amsterdam.
- Gagnon, S., & Karacabeyli, E. (2013). *Status of cross-laminated timber construction in North-America*. Viena,: Vienna University of Technology.
- Galvez, F. (2017). *Teoría, diseño y práctica con bambú, riesgo y sostenibilidad en San Antonio Suchitepéquez*. (Arquitecto), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala Retrieved from <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8135/1/FRANCISCO%20DANIEL%20G%C3%81LV EZ%20AVILA.pdf>
- García, C. (2013). *Estudio de comportamiento de demanda para el uso de caña guadua y bambú gigante en Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/6595>
- Geddes, K. (2003). *Polyvinyl and ethylene-vinyl acetates: Handbook of Adhesive Technology*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Gibson, L. J. (2012). The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of The Royal Society Interface*, 9(76), 2749-2766.
- González, O. M. (2018). *The Ingenious Tree of Life, A biomechanical Approach to Cocowood Science*.: Lambert Academic Publishing
- Gonzalez, O. M., & Nguyen, K. A. (2016). *Influence of density distribution on the mechanical efficiency of coconut stem green tissues*. Vienna: Austria. Publisher: Vienna University of Technology.
- González, O. M., & Nguyen, K. A. (2016). Cocowood Fibrovascular Tissue System—Another Wonder of Plant Evolution. *Frontiers in plant science*, 7, 1141. doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01141>
- Goverse, T., Hekkert, M. P., Groenewegen, P., Worrell, E., & Smits, R. E. (2001). Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints. *Resources, Conservation and Recycling*, 34(1), 53-74.
- 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). doi:<https://doi.org/10.1029/2007GL032887>
- Guerrero, V., Dávila, J., Galeas, S., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales* (Primera edición ed.). Quito, Ecuador Imprefepp.
- Heiko , J. L. (2007). *Light Weight Panels: Summary of a New Development in Europe*. Paper presented at the All Division 5 World Conference, Taipei
- Heine, J., & Heine, M. (2014). *Lightweight Structures in Architecture, The principle need to reduce the overconsumption of building materials*. Retrieved from
- Herrmann, A. S., Zahlen, P. C., & Zuardy, I. (2005). *Sandwich structures technology in commercial aviation*. Paper presented at the Sandwich structures 7: Advancing with sandwich structures and materials, Denmark

- Hibsch, C., Alvarado, A., Yepes, H., Sebrier, M., & Pérez, H. (1996). Falla Activa de Quito y Fuentes Sismogenéticas Regionales: Un estudio del Riesgo Sísmico de Quito con el Análisis de los sedimentos cuaternarios. *Boletín del Instituto Frances de Estudios Andinos*, 25(3), 359-388.
- Humphries, S., & Cabrera, A. (2010). Ecuador: Allpabambu – a family bamboo enterprise, 34. Retrieved from Earth in innovation website: <https://earthinnovation.org/wp-content/uploads/2014/09/Humphries-and-Cabrera-3.pdf>
- Idemat. (2015). *Eco-costs 2015 V3.3 of the Environmental Product Declarations of IBU*. from Delft University of Technology. <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/5-data.html> <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/5-data.html>
- Janssen, J. (1981). *Bamboo in building structures*. (Doctor of Philosophy), Technische Hogeschool Eindhoven, Holland Retrieved from <https://doi.org/10.6100/IR11834>
- Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). *CLT: Handbook Cross-laminated Timber*. United States: FPInnovations.
- Kasal, B., Kruse, D., Rüter, N., & Polocoser, T. (2013). Merging seismic and fire design of timber buildings and potential and limitations on going high. *Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges*.
- Kawasaki, T., & Kawai, S. (2006). Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. *Journal of wood science*, 52(1), 75-83.
- Khademi-Zahedi, R. (2018). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space*.
- Khidir, E. A., Harun, Z., Nor, M. J. M., & Razi, M. (2013). A comparative study of sound transmission loss provided by glass, acrylic and polycarbonate. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, 60, 1-4).
- Kim, J., & Rigdon, B. (1998). *Qualities, Use, and Examples of Sustainable Building Materials; National Pollution Prevention Center for Higher Education*. (Arquitect), The University of Michigan. Retrieved from <http://www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/ARCHpdfs/ARCHsbmIntro.pdf>
- Knippers, J., & Speck, T. (2012). Design and construction principles in nature and architecture. *Bioinspiration & biomimetics*, 7(1).
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N., & Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *WIT Transactions on The Built Environment*, 59(10). doi:<https://doi.org/10.2495/HPS020161>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2011). *Design and control of concrete mixtures*. United States of America: Portland Cement Association.
- Kotlarewski, N. J., Ozarska, B., & Gusamo, B. K. (2014). Thermal conductivity of Papua New Guinea balsa wood measured using the needle probe procedure. *BioResources*, 9(4), 5784-5793.
- Larco, M. (2017). *Caracterización físico mecánica de los laminados de bambú Dendrocalamus asper como material sostenible constructivo para proyectos arquitectónicos en el noroccidente de la provincia de Pichincha (Ecuador)*. (Tesis doctoral), Universidad de Extremadura, España. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=125174>

- Lavell, A. (2005). Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica. *Comarcas Vulnerables: Riesgos y desastres naturales en Centroamérica y el Caribe*, 11-44.
- Lay, D. G., & Cranley, P. (2003). *Polyurethane adhesives: Handbook of adhesive technology*. New York Marcel Dekker, Inc.
- León, E. Z. (2013). Mampostería Postensada Una alternativa constructiva para Ecuador y regiones sísmicas. *Revista de la Facultad de arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 2(3), 23-43.
- Macías, J. (2017). *Programa de gestión ambiental para la central del bambú Andoas (Cenba) del gobierno autónomo descentralizado Provincia de Pichincha*. (Especialización en gestión ambiental local con énfasis en gestión integral de la Guadua), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Retrieved from <http://hdl.handle.net/11059/8115>
- Magenes, G. (2006). Masonry building design in seismic areas: recent experiences and prospects from a European standpoint. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/242207613_Masonry_building_design_in_seismic_areas_Recent_experiences_and_prospects_from_a_European_standpoint
- Manalo, A., Aravinthan, T., Karunasena, W., & Islam, M. (2010). Flexural behaviour of structural fibre composite sandwich beams in flatwise and edgewise positions. *Composite Structures*, 92(4), 984-995.
- McAndrew, D. (1999). *Behaviour and design of sandwich panels for flexural wrinkling*. (Master by research), Queensland University of Technology, Queensland, Australia Retrieved from <https://eprints.qut.edu.au/36095/>
- Mejia, J., & Pachacama, N. (2018). *Diseño de bloques para mampostería en obras civiles con agregados de fibras de caucho de neumático y plástico reciclado (PET)*. (Ingeniería Civil), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador Retrieved from <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15044>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Cuenta de emisiones al aire *Sistema de Contabilidad Ambiental Nacional, Exploración Inicial 2008-2012* (pp. 52).
- Minke, G. (2001). Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. Retrieved from <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/4ESO/MedioNatural2/ManualMinkeSpan.pdf>
- Moncayo, G. (2017). *Caracterización de las propiedades mecánicas de la madera de balsa (Ochroma Pyramidale) ecuatoriana*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13244>
- Mosalam, K. M., Hagerman, J., & Kelly, H. (2008). Seismic evaluation of structural insulated panels. *5 th International Engineering and Construction Conference*.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). *Peligro Sísmico*: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- 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.

- Páez, D. (2016). Influencia de muros de mampostería en el comportamiento de edificios de Manta durante el terremoto de 16 de abril del 2016, Pedernales-Ecuador. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21(3).
- Panchi, O. (2013). *Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en Ecuador*. (Riesgos Geológicos y Gestión Territorial), Universidad Complutense de Madrid, Madrid. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1221/1/T-SENESCYT-000352.pdf>
- Plantabal S.A. (2016). *BALTEK SB (Select Grade Structural Balsa)* data sheet
- Pokharel, N. (2003). *Behaviour and design of sandwich panels subjected to local buckling and flexural wrinkling effects*. School of Civil Engineering, Queensland University of Technology. Doctor on Filosofía Retrieved from https://eprints.qut.edu.au/15890/1/Narayan_Pokharel_Thesis.pdf
- Pokharel, N., & Mahendran, M. (2004). Finite element analysis and design of sandwich panels subject to local buckling effects. *Thin-walled structures*, 42(4), 589-611.
- Pozorska, J. (2018). *Numerical modelling of sandwich panels with a non-continuous soft core*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Raigosa, E. (2010). *Técnicas de reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales*. (Maestría en Ingeniería en Construcción), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica Retrieved from https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6167/tecnicas_reforzamiento_estructuras_construidas_concreto_deficiencias%20estructurales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramos, P. (2016). "*Balsa*" *Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb.(Bombacaceae)*. (Doctorado en Ciencias biológicas), Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/56011>
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yepes, H. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Quito, Ecuador: Corporación Editora Nacional
- Rodriguez, M., Restrepo, J., & Torres, M. (2015). *EVALUACION DE LA RIGIDEZ LATERAL EFECTIVA DE COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO*. Mexico Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Rojas, F., & Torres, G. (2008). Árboles del valle central de Costa Rica: reproducción. *Kurú: Revista Forestal, Costa Rica*, 6(17), 1-3.
- Rungthonkit, P. (2012). *Structural behaviour of structural insulated panels (SIPS)*. (Civil Engineer), University of Birmingham, Birmingham. Retrieved from <http://etheses.bham.ac.uk/3561/>
- Sabnis, A., & Pranesh, M. (2017). Building Materials Assessment for Sustainable Construction Based on Figure of Merit as a Concept. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(2), 203-217.
- Salazar, H. (2014). *Vivienda con estructura de madera en la ciudad de Guayaquil* (Ingeniería Civil), Universidad de Especialidades Espíritu Santo Guayaquil, Ecuador Retrieved from <http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/570>
- Sandberg, D. (2016). Additives in Wood Products—Today and Future Development *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts* (pp. 105-172): Springer.
- Schickhofer, G. (2010). *Cross laminated timber (CLT) in Europe—from conception to implementation*. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Retrieved from

- https://www.holzbauforschung.at/fileadmin/user_upload_hbf/News/2011/Vancouver_2010.pdf
- Schlaich, J., & Schlaich, M. (2000). Lightweight structures. *Widespan roof structures*, 4(1), 177-188.
- Schröder, S. (2010). *Dendrocalamus asper*. Retrieved from <https://www.guaduibamboo.com/species/dendrocalamus-asper>
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016). *Informe de situación Terremoto 7.8° -Perdernales*. Retrieved from
- Shah, D. U., Bock, M. C. D., Mulligan, H., & Ramage, M. H. (2016). Thermal conductivity of engineered bamboo composites. *Journal of Materials Science*, 51(6), 2991-3002. doi:<https://doi.org/10.1007/s10853-015-9610-z>
- Shrive, G., Masia, M. J., & Lissel, S. L. (2001). *Strengthening and rehabilitation of masonry using fibre reinforced polymers*. Retrieved from <http://www.hms.civil.uminho.pt/events/historica2001/page%201047-1056%20152.pdf>
- Stein, S., & Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*: John Wiley & Sons.
- Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas: Guía didáctica de materiales compuestos*. Retrieved from <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>
- Symonds, A., & COWI, Y. P. B. (1999). *Construction and Demolition waste management practices, and their economic impacts*. Retrieved from Alemania:
- Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K., & Soboyejo, W. (2011). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta biomaterialia*, 7(10), 3796-3803. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- Ugural, A. (2008). *Mechanics of Materials* (J. W. S. Inc Ed.). United States of America: John Wiley & Sons Inc. New Jersey Institute of Technology.
- Usman Aminu, U., M.F.Khamidi, & Hassan, T. (2012). *Sustainable Building Material for Green Building Construction, Conservation and Refurbishing*. Paper presented at the Management in Construction Research Association (MiCRA), Postgraduate Conference, Kuala Lumpur
- Vargas, L. R. D. (2010). Terremoto en Haití: las causas persistentes de un desastre que no ha terminado. *Nueva sociedad*, 226, 13-20).
- Vinson, J. R. (2005). *Sandwich structures: past, present, and future*. Paper presented at the Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Denmark.
- Vogtlander, J. G., & Van der Lugt, P. (2014). *The Environmental Impact of Industrial Bamboo Products: Life-cycle Assessment and Carbon Sequestration*. Delft, Netherlands: International Network for Bamboo and Rattan.
- Wegst, U., & Ashby, M. (2004). The mechanical efficiency of natural materials. *Philosophical Magazine*, 84(21), 2167-2186.
- Wegst, U. G. (2011). Bending efficiency through property gradients in bamboo, palm, and wood-based composites. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 4(5), 744-755.
- White, J. (1956). End Grain Balsa as a Sandwich Core Material: A Study of the Properties of Wood Cored Panels used in the Construction of Aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 28(6), 199-201. doi:<https://doi.org/10.1108/eb032702>

- Williams, G. (2002). Engineered wood products-Experience and opportunities. *NZ Timber Design Journal*, 2(8), 6-13.
- Yüksek, İ. (2015). The evaluation of building materials in terms of energy efficiency. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 59(1), 45-58.
- Zea Escamilla, E., Habert, G., Correal Daza, J., Archilla, H., Echeverry Fernández, J., & Trujillo, D. (2018). Industrial or Traditional Bamboo Construction? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Bamboo-Based Buildings. *Sustainability*, 10(9), 3096. doi: <https://doi.org/10.3390/su10093096>