



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas  
realizadas con fardos de paja y mochetas de madera**

García Peñaloza, Marcos Andrés

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría de Investigación en Ingeniería Civil Mención Estructuras

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Ingeniería Civil Mención  
Estructuras

Ing. Caiza Sánchez, Pablo Enrique Ph.D

5 de julio del 2022

# COPYLEAKS

TESIS-ANDRES GARCIA rev.pdf

Scanned on: 12:35 July 15, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	753
Words with Minor Changes	277
Paraphrased Words	1031
Omitted Words	0



Firmado electrónicamente por:  
**PABLO ENRIQUE  
 CAIZA SANCHEZ**

.....  
**Ing. Caiza Sánchez, Pablo Enrique Ph.D**

**Director**



**Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología**

**Centro de Posgrados**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **"Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas realizadas con fardos de paja y mochetas de madera"** fue realizado por el señor **García Peñaloza, Marcos Andrés**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 5 de julio del 2022**

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**PABLO ENRIQUE  
CAIZA SANCHEZ**

.....  
**Ing. Caiza Sánchez, Pablo Enrique Ph.D**

**Director**

**C.C.: 1707597272**



## Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

### Centro de Posgrados

#### Responsabilidad de Autoría

Yo **García Peñaloza, Marcos Andrés**, con cédula de ciudadanía n°1722813340, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas realizadas con fardos de paja y mochetas de madera** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 5 de julio del 2022**

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS ANDRES  
GARCIA PENALOZA**

.....  
**García Peñaloza, Marcos Andrés**

**C.C.: 1722813340**



**Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología**

**Centro de Posgrados**

**Autorización de Publicación**

Yo **García Peñaloza, Marcos Andrés**, con cédula de ciudadanía n°1722813340, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Validación analítica de resultados experimentales de vibración ambiental de casas realizadas con fardos de paja y mochetas de madera** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 5 de julio del 2022**

Firma:



Digitado electrónicamente por:  
**MARCOS ANDRES  
GARCIA PENALOZA**

.....  
**García Peñaloza, Marcos Andrés**

**C.C.: 1722813340**

## Dedicatoria

En primer lugar, dedico todo el esfuerzo y perseverancia que se ve plasmado en este trabajo a Dios porque el me ha dado la fuerza y sabiduría para continuar con mis estudios.

Dedico este trabajo de investigación y todos estos años de esfuerzo a mi familia, la cual me ha brindado todo su apoyo durante este largo caminar.

A mi padre Héctor, por su paciencia y enseñanzas conmigo, por ser ese amigo y consejero incansable que siempre está pendiente de mí. Te amo papá.

A mi madre Mercedes, por su inconmensurable amor, por compartir conmigo su espíritu de lucha y la enseñanza de que todo es posible si uno de verdad lo quiere y está dispuesto a esforzarse por ello. Te amo mamá

A mi hermano Carlos, porque cuando pienso en alguien incondicional siempre está él, porque ha sido mi ejemplo a seguir, mi primer y mejor amigo. Gracias por todo tu apoyo y lo que has hecho por mí.

A mi hermana Giselle, por todo su cariño y comprensión en esta época de estudio. Tu eres el motivo por el cual siempre quiero ser mejor.

A mi hermosa novia Sofía, porque sin ella simplemente nada de esto se habría realizado, porque siempre estuvo pendiente de mí, porque cuando decaía ella estaba para levantarme, para brindarme su amor y darme fuerzas para seguir adelante. Gracias mi amor, porque, así como los sacrificios, las alegrías y felicidad también las seguiremos viviendo juntos. Es nuestro momento.

A mi cuñada Diana y a mi próximo sobrino, porque se que ahora hay alguien por quien esforzarse el triple y desde ya lo estoy esperando con mucho amor.

Finalmente dedico este trabajo a todos mis amigos y amigas, por todas las vivencias y experiencias que nos ha llevado este camino. Todo fue fantástico.

***Marcos Andrés García Peñaloza***

## Agradecimiento

Agradezco a Dios por haberme dado esta oportunidad y por permitirme estar acompañado de mi familia y amigos en salud.

A toda mi familia, por siempre confiar en mí, por cuidarme y apoyarme en los momentos más difíciles de mi vida, sin ustedes yo no sería nadie. Gracias por estar conmigo en todo lo que me propongo. Esto es para ustedes.

A mi novia Sofia Pineda, porque una vez más me has demostrado que el amor lo puede todo, por todas las horas de desvelo que pasamos, por siempre presionar para no desfallecer, por estar junto a mi para no rendirme, por todo tu amor y paciencia. Gracias negrita mía te amo.

Al Ing. Pablo Caiza, Ph. D, por permitirme realizar este proyecto, por toda su dedicación, paciencia y apoyo incondicional, por sus enseñanzas y guía durante la ejecución de este proyecto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por permitir e incentivar el desarrollo de la excelencia académica a través de becas, porque ha formado excelentes profesionales, que hoy puedo confirmar son reconocidos en todas las áreas en las que trabajan.

Al Centro de Posgrados porque en esta institución obtuve una gran formación, orientada a la investigación. Agradezco a todo el personal que ahí labora porque siempre estuvo dispuesto a ayudar a los estudiantes, ahora y siempre las considerare buenas amigas.

Al Ing. Medardo Silva, por ser el mentor y amigo que siempre pedí, por brindarme toda su experiencia y confianza, además, no me bastará la vida para agradecer la oportunidad que me dio para demostrar el profesional que puedo llegar a ser.

A un excelente profesional y amigo Walter Juntamay, por apoyarme a lo largo de esta difícil y sacrificada jornada, por todo su apoyo y colaboración, porque a lo largo de este tiempo me ha demostrado que la amistad verdadera es algo que perdura en el tiempo. Gracias por todo mi hermano.

Finalmente agradezco, a todos los amigos y docentes que encontré en esta etapa de mi vida, no cabe duda que he aprendido de todos, gracias por tantas experiencias y apoyo.

***Marcos Andrés García Peñaloza***

## Índice de contenidos

Resumen .....	20
Abstract.....	21
Capítulo I .....	22
Generalidades.....	22
Antecedentes .....	22
Justificación.....	23
Objetivos .....	24
Objetivo General.....	24
Objetivos Específicos.....	24
Planteamiento del problema .....	25
Macro.....	25
Meso.....	25
Micro.....	26
Capítulo II.....	28
Marco teórico .....	28
Antecedentes investigativos .....	28
La Madera.....	28
Características y propiedades de la madera como material de construcción .....	29
Construcción sustentable .....	32
Características técnicas de las viviendas construidas con fardos de paja .....	33
Antecedentes de sistemas constructivos. ....	33

Construcción de viviendas con muros de fardos de paja portantes.....	34
Construcción de viviendas con muros de fardos de paja no portantes.....	35
Paneles elaborados con derivados de la madera.....	36
Aspectos generales de los tableros OSB.....	36
Clasificación de los tableros OSB según grado.....	38
Muros de paneles OSB.....	40
Estructura general de los muros de madera.....	42
Cargas que actúan sobre un muro.....	43
Comportamiento estructural.....	44
Constantes elásticas.....	46
Módulo de Elasticidad.....	46
Módulo de Corte.....	47
Contenido de humedad.....	47
Densidad de la madera.....	48
Propiedades mecánicas.....	48
Flexión de la madera.....	49
Módulo de Ruptura (MOR).....	49
Normativa relacionada.....	50
ASTM D 4442 – 92-Contenido de humedad.....	50
Norma ASTM D2395-2-Densidad específica.....	50
Norma ASTM D 2718 – 00-Corte en paneles estructurales.....	51

Norma ASTM D 3043 – 00-Ensayo a flexión.....	51
Norma ASTM D 3500 – 90-Ensayo a tracción.....	51
Norma ASTM D 3501 – 94-Ensayo a compresión.....	51
Modelación analítica.....	52
Capitulo III.....	55
Determinación de las propiedades Físico - Mecánicas de prototipos de tableros estructurales .....	55
Caracterización física y mecánicas de las probetas.....	57
Contenido de humedad.....	57
Densidad específica.....	62
Ensayo a flexión .....	66
Ensayo a tracción .....	75
Ensayo a compresión .....	78
Ensayo de corte.....	84
Capitulo IV .....	92
Modelamiento y análisis computacional .....	92
Modelamiento de tableros OSB.....	92
Condiciones de borde y propiedades geométricas.....	92
Propiedades mecánicas.....	95
Condiciones de carga .....	95
Cargas estáticas .....	98
Determinación de la carga critica de Euler.....	98

Método de progresión de esfuerzos .....	100
Estudio de convergencia.....	100
Modelamiento estructural de vivienda a base de fardos de paja y mochetas de madera .....	105
Propiedades geométricas .....	105
Condiciones de borde .....	107
Propiedades mecánicas.....	107
Elementos estructurales.....	108
Condiciones de carga .....	113
Definición de materiales.....	116
Definición de secciones .....	117
Definición de tipo de elementos .....	118
Definición de nodos y elementos .....	118
Condiciones de borde .....	123
Estudio de vibración ambiental.....	124
Análisis modal con el software comercial.....	124
Análisis modal solo con fardos de paja .....	127
Análisis modal con el software SeismoStruct.....	128
Análisis modal experimental .....	132
Análisis y discusión de los resultados.....	133
Influencia de los paneles OSB en el comportamiento de la estructura .....	133

Análisis del comportamiento de las secciones equivalentes utilizadas en el software SeismoStruct. ....	134
Comparación del análisis modal de los modelos creados .....	135
Análisis de las masas participativas .....	138
CAPITULO V .....	140
Conclusiones y Recomendaciones .....	140
Conclusiones.....	140
Recomendaciones.....	141
Bibliografía.....	143

## Índice de tablas

Tabla 1	<i>Muestra seleccionada para el ensayo de contenido de humedad</i> .....	59
Tabla 2	<i>Resultados de contenido humedad de cada muestra.</i> .....	61
Tabla 3	<i>Muestras seleccionadas para el ensayo de densidad</i> .....	65
Tabla 4	<i>Resultados del ensayo de densidad específica y peso específico</i> .....	66
Tabla 5	<i>Dimensiones de muestras para el ensayo a flexión</i> .....	70
Tabla 6	<i>Resultados del ensayo a flexión Fuerza-Desplazamiento</i> .....	72
Tabla 7	<i>Resultado del módulo de ruptura del panel OSB</i> .....	73
Tabla 8	<i>Resultados del módulo de elasticidad para cada una de las muestras</i> .....	74
Tabla 9	<i>Fuerza máxima a tracción</i> .....	78
Tabla 10	<i>Dimensiones de las muestras a compresión</i> .....	80
Tabla 11	<i>Fuerza máxima a compresión</i> .....	83
Tabla 12	<i>Dimensiones de las muestras para el ensayo a corte</i> .....	85
Tabla 13	<i>Máximo esfuerzo cortante</i> .....	89
Tabla 14	<i>Cálculo del módulo de rigidez a corte</i> .....	91
Tabla 15	<i>Definición de patrones de carga</i> .....	96
Tabla 16	<i>Configuración de caso de carga para pandeo</i> .....	96
Tabla 17	<i>Comportamiento de elementos finitos</i> .....	104
Tabla 18	<i>Parámetros para la creación del espectro de respuesta</i> .....	114
Tabla 19	<i>Análisis modal con carga temporal (CT)</i> .....	125
Tabla 20	<i>Participación modal de la estructura (CP)</i> .....	126
Tabla 21	<i>Periodos y frecuencias de la estructura</i> .....	126
Tabla 22	<i>Análisis modal con propiedades del OSB nulas</i> .....	127
Tabla 23	<i>Análisis modal con carga temporal (CT)</i> .....	128
Tabla 24	<i>Periodos y frecuencias de la estructura (software SeismoStruct-CP)</i> .....	129
Tabla 25	<i>Masas modales participativas individuales (software SeismoStruct)</i> .....	130

Tabla 26 <i>Masas modales participativas individuales (software SeismoStruct)</i> .....	130
Tabla 27 <i>Análisis modal con la sección equivalente 2</i> .....	131
Tabla 28 <i>Periodos y frecuencias de vibración</i> .....	132
Tabla 29 <i>Influencia de los paneles OSB</i> .....	133
Tabla 30 <i>Resultados del análisis modal de la sección equivalente 1 y 2</i> .....	135

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Centro de la ciudad de la ciudad de Portoviejo</i> .....	27
Figura 2 <i>Comparación del CO2 producido por diferentes materiales</i> .....	29
Figura 3 <i>Comportamiento de la madera frente al fuego</i> .....	31
Figura 4 <i>Sistema de muros de fardos de paja portante</i> .....	35
Figura 5 <i>Sistema de muro de fardos de paja no portante</i> .....	36
Figura 6 <i>Tablero OSB Grado O-1</i> .....	39
Figura 7 <i>Tablero OSB Grado O-2</i> .....	39
Figura 8 <i>Tablero OSB Grado R-1</i> .....	40
Figura 9 <i>Paneles LP OSB</i> .....	41
Figura 10 <i>Muros con tableros LP OSB</i> .....	42
Figura 11 <i>Clasificación del módulo de ruptura</i> .....	49
Figura 12 <i>Ejes globales y locales utilizados en el software comercial</i> .....	53
Figura 13 <i>Panel LP OSB utilizado</i> .....	55
Figura 14 <i>Corte de Panel OSB</i> .....	56
Figura 15 <i>Elaboración de matrices para los cortes de muestras</i> .....	56
Figura 16 <i>Corte y elaboración de muestras</i> .....	57
Figura 17 <i>Probeta para el ensayo de contenido de humedad</i> .....	58
Figura 18 <i>Muestras para el ensayo de contenido de humedad</i> .....	60
Figura 19 <i>Probeta para el ensayo de densidad específica</i> .....	62
Figura 20 <i>Probetas para el ensayo de Densidad</i> .....	64
Figura 21 <i>Probeta para determinar el módulo de elasticidad</i> .....	67
Figura 22 <i>Muestras para el ensayo de flexión</i> .....	69
Figura 23 <i>Maquina y accesorios utilizados en el ensayo a flexión</i> .....	71
Figura 24 <i>Curva fuerza-Desplazamiento del ensayo a flexión</i> .....	71
Figura 25 <i>Curva fuerza-Desplazamiento y línea de tendencia</i> .....	74

Figura 26	<i>Probeta para el ensayo a tracción</i> .....	75
Figura 27	<i>Muestras utilizadas en el ensayo a tracción</i> .....	75
Figura 28	<i>Máquina y accesorios utilizados en el ensayo a tracción</i> .....	76
Figura 29	<i>Curva Fuerza Desplazamiento del ensayo a Tracción</i> .....	77
Figura 30	<i>Probeta para el ensayo a compresión</i> .....	79
Figura 31	<i>Muestras para el ensayo a compresión</i> .....	79
Figura 32	<i>Maquina y accesorio para el ensayo de compresión</i> .....	81
Figura 33	<i>Marcas para centrar la muestra</i> .....	81
Figura 34	<i>Curva Fuerza Desplazamiento del ensayo de compresión</i> .....	82
Figura 35	<i>Curva Esfuerzo-Deformación promedio</i> .....	84
Figura 36	<i>Probeta para ensayo a corte</i> .....	85
Figura 37	<i>Codificación de muestra para el ensayo a corte</i> .....	86
Figura 38	<i>Accesorios para el ensayo a corte</i> .....	86
Figura 39	<i>Ubicación de la muestra en la máquina para el ensayo a corte</i> .....	87
Figura 40	<i>Curva Fuerza-Desplazamiento del ensayo a corte</i> .....	88
Figura 41	<i>Curva fuerza-Desplazamiento y línea de tendencia de la muestra 10</i> .....	90
Figura 42	<i>Definición de las dimensiones del panel</i> .....	92
Figura 43	<i>Definición de las características de la sección del tablero</i> .....	93
Figura 44	<i>Asignación de la sección tipo Shell</i> .....	94
Figura 45	<i>División del tablero en elementos cuadrados más pequeños</i> .....	94
Figura 46	<i>Definición de las propiedades del material</i> .....	95
Figura 47	<i>Asignación de movimiento en la dirección U2</i> .....	97
Figura 48	<i>Ejes locales de puntos y paneles</i> .....	97
Figura 49	<i>Asignación de carga vertical al tablero</i> .....	98
Figura 50	<i>Deformación del pandeo debido a una carga distribuida</i> .....	99
Figura 51	<i>Elementos cuadrados de 500x500mm</i> .....	101

Figura 52	<i>Elementos cuadrados de 300x300mm</i> .....	101
Figura 53	<i>Elementos cuadrados de 200x200mm</i> .....	102
Figura 54	<i>Elementos cuadrados de 150x150mm</i> .....	102
Figura 55	<i>Elementos cuadrados de 100x100mm</i> .....	103
Figura 56	<i>Elementos cuadrados de 75x75mm</i> .....	103
Figura 57	<i>Elementos cuadrados de 50x50mm</i> .....	104
Figura 58	<i>Curva de convergencia de elementos finitos</i> .....	105
Figura 59	<i>Vista en planta, primer piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja</i> .....	106
Figura 60	<i>Vista en planta, Segundo piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja</i> .....	106
Figura 61	<i>Propiedades de la madera solida</i> .....	107
Figura 62	<i>Propiedades de los fardos de paja</i> .....	108
Figura 63	<i>Modelación de columnas tipo mochetas</i> .....	109
Figura 64	<i>Vista 3D-Mocheta</i> .....	109
Figura 65	<i>Vista 3d de los elementos columna</i> .....	110
Figura 66	<i>Vista en planta-Elementos Columnas</i> .....	110
Figura 67	<i>Vista 3d de los muros de fardos de paja</i> .....	111
Figura 68	<i>Vista 3d de los elementos viga</i> .....	111
Figura 69	<i>a) Cercha del pórtico A, I; b) Pórticos B, E y G</i> .....	112
Figura 70	<i>a) Pórtico C; b) Pórtico D y H</i> .....	112
Figura 71	<i>Pórtico F</i> .....	113
Figura 72	<i>Espectro de respuesta</i> .....	114
Figura 73	<i>Espectro de respuesta elástico e inelástico</i> .....	116
Figura 74	<i>Definición de materiales</i> .....	117
Figura 75	<i>Definición de secciones de la estructura</i> .....	117

Figura 76 <i>Definición de tipo de elemento para viga-columna</i> .....	118
Figura 77 .....	118
Figura 78 <i>Ingreso de coordenadas de nodos para columnas</i> .....	119
Figura 79 <i>Unión de puntos para conformar columnas</i> .....	120
Figura 80 <i>Dibujo de viga tipo escalerilla de 350x70mm</i> .....	120
Figura 81 <i>Dibujo de viga tipo escalerilla de 350x110mm</i> .....	121
Figura 82 <i>Dibujo de los elementos de cubierta</i> .....	122
Figura 83 <i>Dibujo de las correas de 50x50</i> .....	122
Figura 84 <i>Dibujo de muros de fardos de paja</i> .....	123
Figura 85 <i>Asignación de condiciones de borde</i> .....	124
Figura 86 <i>Carga temporal (CT) aplicada en la cubierta</i> .....	125
Figura 87 <i>Secciones de mocheta con propiedades nulas</i> .....	127
Figura 88 <i>Carga temporal (CT) en la cubierta</i> .....	128
Figura 89 <i>Sección equivalente 1</i> .....	129
Figura 90 <i>Sección equivalente 2</i> .....	131
Figura 91 <i>Ubicación de los instrumentos para el estudio de vibración ambiental</i> .....	132
Figura 92 <i>Influencia de los paneles OSB- Comportamiento del período</i> .....	134
Figura 93 <i>Periodo de los modelos creados y del análisis experimental</i> .....	136
Figura 94 <i>Comparación de resultados computacionales con análisis experimental</i> .....	137
Figura 95 <i>Participación modal en el sentido Y</i> .....	138
Figura 96 <i>Participación modal en el sentido X</i> .....	139

## Resumen

La implementación de materiales no convencionales en el sector de la construcción ha tomado una mayor relevancia en los últimos años, para reducir la huella de carbono y atenuar la contaminación ambiental, la investigación del comportamiento de estos materiales se ha convertido en un factor indispensable, por esta razón se presenta dos parámetros investigados, en el primero las propiedades físico-mecánicas de los tableros de virutas orientadas o más conocidos como paneles OSB y de los fardos de paja elaborados con los desechos de las plantaciones de cereales como el trigo en la región Andina del Ecuador, mediante el ensayo de 100 probetas se encontró el contenido de humedad, densidad específica, resistencia a la flexión, tracción, corte y el módulo de elasticidad a compresión, en el segundo parámetro se determinó el comportamiento que tienen los materiales al formar parte de una estructura mediante la comparación de resultados. Los valores comparados son los determinados en el análisis experimental con la utilización de sensores y dispositivos de adquisición de datos y los obtenidos a través de la modelación computacional con la ayuda de un software comercial; es necesario validar la modelación computacional utilizando distintos softwares, una vez validado la modelación se compara las respuestas y se determinó que existe una diferencia del 6.81% entre cada periodo fundamental con lo que se valida el análisis in situ.

*Palabras Clave:* paneles de virutas orientadas, software estructural, materiales no convencionales, fardos de paja, propiedades físico-mecánicas

### **Abstract**

The implementation of unconventional materials in the construction sector has become more relevant in recent years, to reduce the carbon footprint and mitigate environmental pollution, the investigation of the behavior of these materials has become an essential factor, for this reason, two investigated parameters are presented, in the first, the physical-mechanical properties of oriented strand boards or better known as OSB panels and of straw bales made with waste from cereal plantations such as wheat in the Andean region. of Ecuador, through the test of 100 specimens, the moisture content, specific density, resistance to bending, traction, shear and the compressive elasticity modulus were found, in the second parameter the behavior of the materials when forming part of a structure by comparing results. The values compared are those determined in the experimental analysis with the use of sensors and data acquisition devices and those obtained through computational modeling with the help of commercial software; It is necessary to validate the computational modeling using different software. Once the modeling has been validated, the responses are compared and it was determined that there is a difference of 6.81% between each fundamental period, with which the in situ analysis is validated.

*Key Words:* oriented strand boards, structural software, unconventional materials, straw bales, physical-mechanical properties

## Capítulo I

### Generalidades

#### Antecedentes

En Ecuador la agricultura es una de las principales fuentes de ingresos para la población rural, donde la cosecha y siembra de trigo es la actividad más practicada (Caguana, 2018)

El ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP, 2017), indica que las provincias con mayor producción de trigo en el país son: Pichincha, Chimborazo, Bolívar y Carchi.

Aproximadamente las provincias de Pichincha e Imbabura producen al año una superficie aproximada de 9140 y 8980 hectáreas de trigo, respectivamente. Cabe destacar que, en el proceso de producción del trigo, la paja se transforma en fardos prismáticos que representan la mitad de la cosecha que se cultiva, esta a su vez puede ser reutilizable, pero termina consumida por el ganado del sector o simplemente es quemada. Es importante recalcar que este material podría ser reutilizado, ya que con 4 toneladas de fardos de paja se alcanzaría a realizar aproximadamente 100 viviendas (PONCE YÁÑEZ, 2017).

Al utilizar materiales convencionales como la madera, barro, arcilla, cal y cemento, conjuntamente con los fardos de paja, es posible garantizar estructuras sostenibles con buenas condiciones ambientales, así como aislamiento de temperatura y humedad dentro de la vivienda. Por otra parte, todo el material de este tipo de viviendas es reciclable lo cual implica menor impacto ambiental y un menor coste energético. Las construcciones con fardos de paja y madera como elemento resistente, son una buena alternativa de construcción sostenible. En países como Francia, Canadá, Inglaterra, Austria, Dinamarca y Australia existen estructuras con este tipo de metodología constructiva que se mantienen en buenas condiciones desde hace más de un siglo (Viera, Aguirre, & Monzó, 2020).

Actualmente Ecuador no cuenta con una normativa de construcción para materiales alternativos como fardos de paja y mochetas de madera, por lo que es preponderante determinar las características mecánicas de estos materiales, su forma de fallo y comportamiento para validar su uso en construcciones rurales (Pachala & Rosero, 2016)

Las viviendas planteadas se componen de dos sistemas, el primero a base de mochetas y vigas de madera (sistema resistente) y el segundo basado en bloques de fardos de paja (sistema de aislamiento) que son utilizados como cerramiento y no cumplen función estructural (Minke & Krick, 2018)

Cabe recalcar que la motivación principal para el uso de estos materiales en sectores rurales no solo se debe a sus beneficios ambientales, sino también por ser materiales propios de la zona, se reducirían costos de construcción dando lugar a que los habitantes de los sectores rurales puedan contar con viviendas accesibles, con una metodología constructiva simple y confortables (Viera, Aguirre, & Monzó, 2020).

### **Justificación**

Dentro de los últimos años la madera como material estructural ha tendido a ubicarse en un segundo plano, frente a las estructuras de hormigón armado, acero e incluso mampostería. Sin embargo, es primordial fomentar su uso ya que esta requiere un consumo energético bajo para su producción en comparación a otros materiales, además es el material de construcción tradicional que genera menor impacto ambiental (Lopez, 2018).

En el país existe cierto detenimiento en el desarrollo académico y profesional entorno a este material, esto se debe a la insuficiente cantidad de investigaciones y a la poca experiencia que se ha generado de su uso. Por esta razón, es importante contribuir a la investigación de este tema para abastecer de conocimiento necesario que sea utilizado en la creación de procedimientos, especificaciones y lineamientos que enriquezcan el diseño y construcción de estructuras de fardos de paja y mochetas de manera que sean eficientes y seguras.

Debido a que Ecuador se encuentra en una región de alta peligrosidad sísmica es preponderante estimar de forma correcta las cargas sísmicas y realizar un diseño sismo-resistente minucioso. De igual manera y dependiendo del lugar de implantación de la estructura se deben considerar los efectos de viento ya que esta puede ser una omisión grave en el caso de estructuras de madera (Fernández, 2018).

El estudio de vibración ambiental de la estructura que se propone en esta investigación se fundamenta en la posibilidad de determinar analíticamente el comportamiento estructural de una vivienda construida a base de fardos de paja y mochetas de madera; y compararla con los resultados experimentales determinados en investigaciones relacionadas, para de esta manera calibrar el modelo computacional para este tipo de estructuras (Paja y mochetas de madera).

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Validar analíticamente los resultados experimentales de vibración ambiental de una vivienda elaborada con paredes de fardos de paja y estructura en base a mochetas de madera, mediante caracterización de paneles OSB y modelos computacionales.

### ***Objetivos Específicos***

- Determinar los métodos y ensayos adecuados para caracterización de paneles OSB.
- Realizar pruebas físico mecánicas de caracterización de paneles OSB a utilizar, mediante ensayos de laboratorio, aplicando la normativa seleccionada.
- Caracterizar la forma de pandeo de paneles OSB de 9 mm de espesor mediante modelamiento analítico.
- Elaborar un modelo computacional para la vivienda realizada a base de fardos de paja y mochetas de madera (alfajías de madera y paneles OSB).

- Determinar la influencia de los paneles OSB en el comportamiento y dinámica de la estructura de fardos de paja.
- Determinar los modos de vibración, periodo y frecuencia de la estructura en análisis, mediante el uso de modelos computacionales.
- Comparar los resultados determinados con la modelación computacional con los resultados obtenidos experimentalmente.

## **Planteamiento del problema**

### ***Macro***

Díaz Cordero (2012) nos indica que hoy en día el cambio climático es una preocupación mundial para todos los gobiernos. Efectos como el calentamiento global, la preocupante degradación de la capa de ozono y la acumulación de residuos son una bomba de tiempo y si el ser humano no quiere desaparecer, se tiene que tomar medidas para frenar este problema. Una de las industrias que más contaminación produce es la construcción, ya que a nivel mundial desde su constitución ha consumido cerca del 50% de los recursos mundiales, generando una serie de alteraciones en el medio circundante para el aire, el suelo, el agua, la flora y la fauna (Solano, 2019). A todo esto, se le suma la deficiente innovación en procesos constructivos y desarrollo de materiales de bajo impacto ambiental, ocasionando que se continúe trabajando con materiales tradicionales como el hormigón, bloque, ladrillo y acero sobre todo en construcciones informales. En los últimos 30 años la vivienda informal ha constituido la mayor parte del desarrollo urbano en las ciudades más grandes del mundo y esto se ve agravado cuando las edificaciones son sometidas a una demanda como sismos o movimientos telúricos (Alexander, 1987; Peche Melo, 2020).

### ***Meso***

Latinoamérica en los últimos años ha experimentado eventos sísmicos de alta intensidad, países como Chile, Ecuador, Perú y Haití son ejemplos de cómo la construcción

informal acarrea problemas enormes cuando las viviendas no regularizadas son sometidas a una demanda sísmica alta. De la misma manera, la falta de control por parte de entes gubernamentales y la deficiente innovación de sistemas constructivos con biomateriales obliga a la gente de bajos recursos a construir estructuras de manera empírica y con materiales que están a su alcance, ocasionando pérdidas humanas en eventos sísmicos, debido al colapso de su hogar (Viera, 2020).

Al no sustituir la metodología constructiva tradicional de América Latina por procesos más eficientes y de bajo impacto ambiental con recursos renovables (como madera, paja, adobe), la contaminación aumentará de manera exponencial conforme aumente la población (Gudynas, 2009).

### ***Micro***

Uno de los mayores sismos registrados en Ecuador, se presentó el 16 de abril de 2016 en la Región costera norte, ocasionando un daño social y económico sin precedentes para esta zona. Según el levantamiento de información realizado por la Secretaría de Gestión de Riesgos en el 70% de hogares de la parroquia Tonsupa hubo daño significativo en su estructura. A su vez a pocos kilómetros de distancia en la ciudad de Atacames el 40% de la infraestructura hotelera presento daños irreversibles e incluso algunas alcanzaron el colapso (véase Figura 1)(Bonilla, 2016).

**Figura 1**

*Centro de la ciudad de la ciudad de Portoviejo*



*Nota:* Recuperado de (El Comercio, 2016)

Vizúete (2011) indica que cerca del 70% de la construcción en el país es informal, por lo tanto, es necesario implementar un sistema de construcción alternativo en base a biomateriales (madera y paja), que cumpla con los requisitos estructurales y contribuya a disminuir el impacto ambiental de esta industria y también a frenar la informalidad de la construcción en Ecuador. Al realizar sistemas constructivos propios, se utilizará materiales de la zona tales como madera y derivados de la misma, como fardos de paja que son muchas veces residuos de actividades agrícolas.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### Antecedentes investigativos

##### *La Madera*

Es una de las materias primas más explotadas por el hombre y se obtiene de los tallos leñosos, cuya parte más sólida se la puede encontrar en la corteza del árbol. Uno de sus usos es la creación de productos para diversas actividades, pero también a razón de sus propiedades puede ser utilizada en la construcción de edificaciones de espacios habitables en numerosos proyectos (Quintana, 2018).

En Ecuador existen extensas zonas forestales que aportan en gran medida a la reducción de gases de efecto invernadero, cabe destacar que durante la etapa inicial de crecimiento los árboles poseen una mayor capacidad de capturar carbono que en su etapa madura (Carlosama, 2021). Por otro lado, a través del proceso de la fotosíntesis los árboles pueden absorber y mantener en sus paredes celulares grandes cantidades de dióxido de carbono el cual a su vez puede representar una cantidad superior a la mitad del peso seco de un árbol, a todo esto, se suma que la madera es uno de los materiales con menor trazabilidad de huella de carbono (Pedrero, 2018).

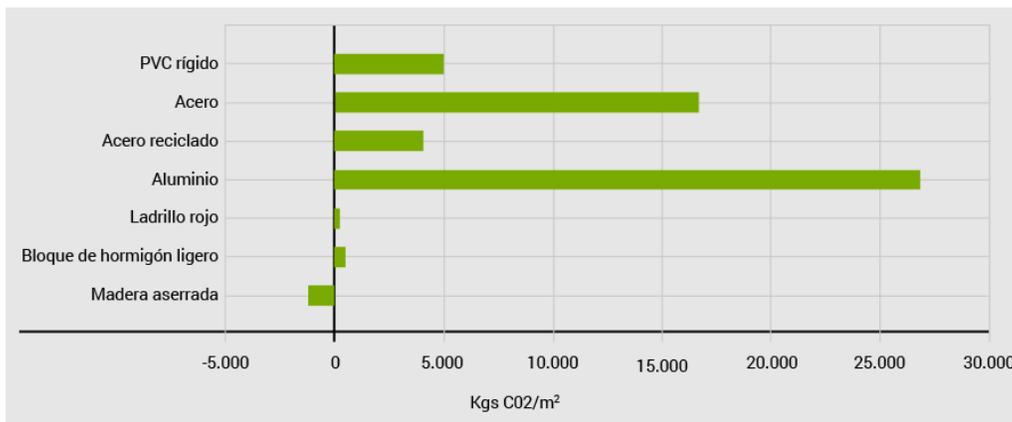
La energía requerida para realizar los trabajos de extracción y manufactura de madera es mucho menor que la necesaria en la elaboración de otros tipos de materiales, además dicha energía es obtenida de fuentes renovables. Por otro lado, para la elaboración de materiales como el cemento, vidrio y acero se requiere altas temperaturas que solo se pueden obtener con grandes cantidades de energía que proviene de combustibles fósiles. Cabe mencionar que la energía requerida para producir una tonelada de materiales convencionales como el hormigón y el acero es entre cinco y veinticuatro veces mayor que la utilizada en la producción de una tonelada de madera (Quintana, 2018).

Debido al avance de la industria forestal se ha minimizado la producción de residuos sólidos durante el proceso de obtención de la madera, además, en la actualidad toda la materia prima de la madera es reutilizable en elaboración de productos útiles, como paneles reconstruidos, fibras y combustibles, lo cual no sucede con materiales como del hormigón, el ladrillo y el metal, que respectivamente generan mayor CO<sub>2</sub> en su obtención (CEI-Bois, 2018).

A continuación, en la figura 2 se presenta la comparación del CO<sub>2</sub> generado para la producción de diferentes materiales.

## Figura 2

*Comparación del CO<sub>2</sub> producido por diferentes materiales*



*Nota:* Recuperado de (CEI-Bois, 2018)

## Características y propiedades de la madera como material de construcción

### Ventajas

#### Aislante acústico, térmico y eléctrico

La madera está constituida de fibras huecas que se encuentran alineadas axialmente en toda la longitud del árbol, estos espacios huecos permiten que la madera posea cualidades como aislamiento de calor y de sonido, el resultado de contar con una buena absorción acústica es el atenuar la reverberación de ondas sonoras minimizando el ruido (Arizabal, 2018).

A su vez, debido a la porosidad de la madera, esta cuenta con una baja conductividad térmica, que, al combinarla con otros materiales como fibra de trigo, laminas minerales o

poliestireno se puede obtener excelentes propiedades de aislamiento térmico incluso en climas extremos. Por otro lado, al contar con cavidades en la estructura celular de la madera se puede obtener un aislamiento al calor entre 6 y 400 veces superiores que, al utilizar materiales convencionales como hormigón y acero, respectivamente. Por otra parte, cuando la madera se encuentra en un estado seco, es decir, cuando su contenido de humedad es inferior al 20% se puede concluir que es eficiente como aislante eléctrico (Quintana, 2018)

### **Durable**

Si se realiza un correcto diseño, ejecución y mantenimiento de la madera se puede obtener estructuras duraderas, en el mundo aún existen construcciones en madera que han logrado mantenerse en pie durante cientos de años y cuentan con un excelente estado de conservación. Cabe mencionar también que la madera es un material capaz de resistir a un número variado de compuestos químicos logrando contar con un mejor comportamiento que el hierro y el acero a la acción de soluciones, ácidos y ambientes salinos (Quintana, 2018).

### **Regulador de humedad**

Según (Quintana, 2018), la madera mantiene un equilibrio higroscópico con el medio, tomando o cediendo humedad según el lugar donde se implanta. Por dicho motivo, la presencia de madera en una vivienda regulariza la humedad del medio interior.

### **Material Sismo-resistente**

Las construcciones realizadas en madera pueden contar con un comportamiento similar o superior a las realizadas con materiales convencionales durante un evento sísmico, esto se debe al peso de las mismas ya que las fuerzas sísmicas son proporcionales al peso de las estructuras y las construcciones en madera son entre seis y nueve veces más livianas que las construidas en acero y hormigón, respectivamente. A causa de esto se puede concluir que están expuestas a impactos menores que otras construidas con materiales más pesados (Quintana, 2018).

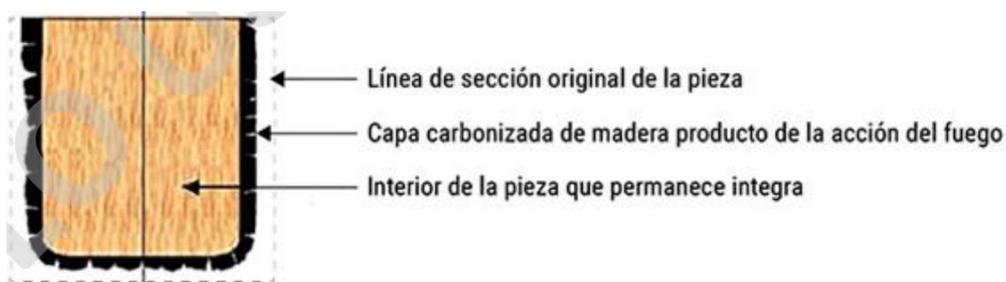
## Resistente al fuego

La gran mayoría de materiales en el mundo sufren algún tipo de daño o cambio al ser expuestos a altas temperaturas. En el caso de la madera gracias a sus propiedades intrínsecas obtiene una resistencia al fuego de hasta los 250°C, temperatura a la cual materiales como el acero comienzan a debilitarse, además en el caso de que llegue a inflamarse debido a que cuenta con una baja conductividad térmica hace que se queme lentamente a la vez que forma en la parte exterior una capa de carbón la cual protege la parte interna lo que ayuda a conservar durante un mayor periodo de tiempo sus propiedades estructurales (Vargas, 2020)

Esto permite que durante un incendio los habitantes tengan el tiempo suficiente para evacuar la vivienda con seguridad.

### Figura 3

*Comportamiento de la madera frente al fuego*



*Nota:* Recuperado de (Quintana, 2018)

### Desventajas

Una de las desventajas de la madera son los efectos por agentes externos sean estos: rayo ultravioleta, humedad o agentes bióticos como hongos, termitas, entre otros. Para proteger a la madera de estos agentes externos existen diversos criterios, por ejemplo, el separar la madera del suelo una altura superior a 30cm, ubicar la madera en forma inclinada en lugar de forma horizontal, utilizar envolventes ventiladas para que la madera respire y pueda evacuar su humedad, la generación de aleros corta goteros y botaguas para evitar el contacto directo del agua con la madera (Bello & Villacreses, 2021)

## **Construcción sustentable**

El consumo energético y la explotación de recursos naturales han sido la base de la industria de la construcción durante mucho tiempo, por lo tanto, es un reto creciente el minimizar los impactos ambientales con estructuras sostenibles basadas en nuevos sistemas constructivos con materiales renovables y de fácil descomposición. Es importante enfocar todos los esfuerzos en controlar el gasto energético que se genera en la producción de materiales convencionales (hormigón y acero), cambiando la metodología de trabajo por nuevos materiales ingenieriles derivados de madera que generen menos emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente (Quintana, 2018).

Según (Mendoza & Vanga, 2020), la construcción sustentable debe promover la fabricación de productos que puedan reducir los efectos ambientales adversos, proporcionar a los consumidores una orientación e información exacta con base científica sobre sus productos, y contribuir a la ejecución de mejoras ambientales. La construcción sustentable debe considerarse como la ampliación de una construcción tradicional, pero con una gran conciencia y responsabilidad hacia el medio ambiente por cada una de las personas y factores involucrados, lo que implica un mayor interés en el uso consciente de recursos naturales, de tal manera que se prevenga la contaminación ambiental y de esta forma se provea de un ambiente saludable tanto en el interior de las edificaciones como en su entorno (Mendoza & Vanga, 2020). Este es el caso de los paneles de fardos de paja y mochetas de madera que se unifican en un nuevo proceso constructivo.

### **Fardos de paja como elemento de construcción**

En Ecuador se produce un promedio de 2.5 toneladas de trigo por año, sin embargo, se tiene un déficit cualitativo de vivienda en estas zonas rurales entre el 1.3% y el 6.6%. Por otra parte, dentro de esta cosecha, la paja es un desecho que se empaca en forma de fardos prismáticos que representan la mitad de la producción. Se debe destacar que estos desechos

normalmente se emplean como alimento para el ganado o a su vez para cubrir los suelos de las heladas, abono o simplemente como piso de establos (Viera, Aguirre, & Monzó, 2020).

Alrededor del mundo se produce aproximadamente 600 millones de toneladas de cereal al año, de las cuales por cada tonelada cosechada se genera 1.5 toneladas de paja como desecho agrícola, de donde el 90% de esta es quemada (Viera, 2020).

Según (Ponce, 2017), en Chile se quema más de 4 toneladas de paja; si este material fuese aprovechado se podría construir 100 viviendas con un enfoque sustentable y de bio-construcción.

Es importante recalcar que al utilizar la paja como material de construcción en zonas rurales del país se reduce el impacto ambiental debido al uso de materiales innovadores que se complementan con materiales propios de la zona, para lograr el emplazamiento de viviendas unifamiliares económicas y de fácil construcción para las personas que habitan en estos lugares (Viera, Aguirre, & Monzó, 2020).

### **Características técnicas de las viviendas construidas con fardos de paja**

#### ***Antecedentes de sistemas constructivos.***

En las viviendas con fardos de paja pueden distinguirse dos sistemas constructivos diferentes. El primero conocido como portante o su nombre en inglés “Load Bearing”, en el cual el peso de la cubierta se descarga sobre los fardos de paja que se asientan sobre los cimientos que tienen una estructura independiente que puede ser de madera, hormigón ciclópeo o mampostería de piedra, este tipo es también es conocido como “Técnica Nebraska”, por haber sido utilizado por primera ocasión en este estado a finales del siglo XIX (Minke & Krick, 2018).

El canadiense Luis Gagne por su parte ideó un sistema constructivo de muros portantes llamado “Morta-red-bale matrix system” o también conocido como “técnica de Gagne”, el cual consiste en la colocación de fardos de paja de acuerdo a una mampostería tradicional en la cual la unión se genera con mortero de cemento-arena, mientras que se dejan entre los fardos

juntas en cruz para conformar los entramientos horizontales y verticales que cumplen la función estática de la mampostería clásica (Pachala & Rosero, 2016).

Por otro lado, se tiene el sistema constructivo “Non Load Bearing” o “Infill bale Walls”. En este sistema la estructura puede ser de madera, acero u hormigón armado, elementos que se encargaran de soportar las cargas de las cubiertas y transmitir las mismas a la cimentación. Con este sistema los fardos de paja no tienen que someterse ante ninguna solicitud estructural y su única función es utilizarlos como paredes con propiedades de aislamiento térmico y acústico (Minke & Krick, 2018).

Se han desarrollado nuevas variantes de estos sistemas constructivos en los que se convierten los fardos de paja en verdaderos ladrillos con aristas vivas logradas mediante altas presiones durante el proceso de compresión de los mismos, de igual forma estos mampuestos podrían ser utilizados con o sin mortero. Otro uso para los fardos de paja es el revestimiento de muros existentes actuando como capas aislantes (Pachala & Rosero, 2016)

### ***Construcción de viviendas con muros de fardos de paja portantes.***

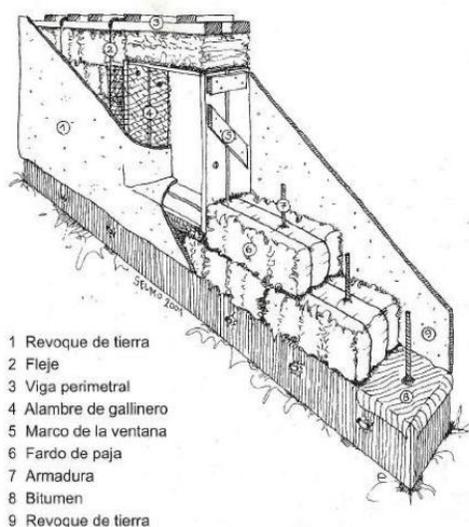
El sistema constructivo basado en muros portantes de fardos de paja permite transmitir el peso de la cubierta hacia la cimentación sin la necesidad de otro elemento estructural, debido a la simplicidad en la ejecución de este sistema su mayor desarrollo se dio a finales del siglo XIX en los Estados Unidos gracias al invento de la prensa enfardadora (Minke & Krick, 2018). Por medio de la experiencia obtenida con la implementación de este tipo de sistema constructivo se ha establecido normativamente que la altura de los muros debe ser máximo 5 veces el ancho de los mismos, esto se ve reflejado en que la mayoría de construcciones de este tipo son de una sola planta, pese a esto si se desean realizar viviendas de mayor altura se deberá aumentar las dimensiones de los fardos de paja.

Para la puesta en marcha de este tipo de edificaciones se debe verificar el nivel de compactación de los fardos de paja. En todos los casos la coronación de los muros deberá ser rematada con vigas perimetrales, las cuales se unirán a la cimentación con la ayuda de

elementos de tensión embebidos en los muros, lo cual asegura que los fardos no reciban cargas adicionales, también se puede utilizar varillas de acero de puntas roscadas como elementos de tensión para la unión de las vigas de coronación con la cimentación a través de flejes interiores o exteriores (Minke & Krick, 2018).

#### Figura 4

##### *Sistema de muros de fardos de paja portante*



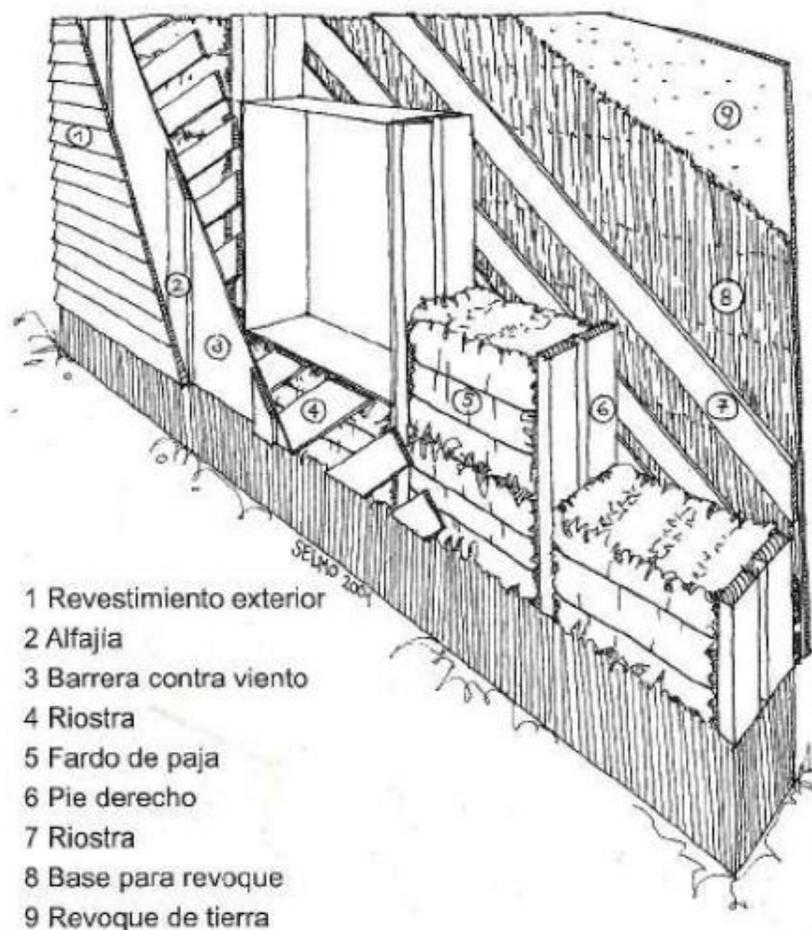
*Nota:* Recuperado de (Minke & Krick, 2018)

##### ***Construcción de viviendas con muros de fardos de paja no portantes***

En este sistema constructivo los fardos de paja solamente aportan con su peso propio debido a que no soportan ni transmiten cargas adicionales, por lo cual, es necesario conectar los fardos con elementos de arriostramiento para proveer la suficiente resistencia a cargas horizontales. La única función de los fardos de paja es de relleno que a su vez provee a la vivienda de aislamiento térmico, por otro lado, los elementos encargados de transmitir las cargas a través de la estructura comúnmente son conformados por pórticos de madera (Jones, 2015).

**Figura 5**

*Sistema de muro de fardos de paja no portante*



*Nota:* Recuperado de (Minke & Krick, 2018)

## **Paneles elaborados con derivados de la madera**

### ***Aspectos generales de los tableros OSB***

Los tableros de virutas orientadas (Oriented Strand Board, OSB), son paneles producidos con virutas de madera reconstituida las cuales después de ser secadas, son pegadas con adhesivos como el fenol formaldehído y Metileno difenil diisocianato (MDI) que son resistentes al agua, ubicadas en capas direccionadas y finalmente prensadas, se puede tener como resultado un tablero con excelentes propiedades físico-mecánicas es apto para ser utilizado como elemento estructural ya sea en la parte interna o externa de viviendas. Cabe

recalcar que las virutas u hojuelas no son productos de desecho de ningún otro proceso de fabricación (Rivera C. , 2018)

En países como Canadá y Estados Unidos las hojuelas que se utiliza en los tableros OSB se fabrican con madera de bosques naturales de álamo, mientras que en el sur de los Estados Unidos la madera es extraída de bosques mixtos de latifoliadas y de pino amarillo (Pacini, 2018)

Alguna de las especies de madera que se puede utilizar en la producción de tableros OSB es al álamo temblón (*populus tremuloides*) y el pino amarillo del sur (*pinus palustris*, *Pinus taeda*, *Pinus echinata*), también se puede utilizar maderas frondosas como el abedul (*Betula spp.*), tulipanero (*Liriodendron tulipifera*) y liquidámbar (*liquidambar styraciflua*) (APA, 2017).

Los tableros se han desarrollado técnicamente para la construcción de estructuras de alta calidad, que sean resistentes y fáciles de trabajar, procurando que se pueda trozar atornillar, lijar, cepillar, perforar y clavar mediante la utilización de herramientas comunes. Otra de sus cualidades es que son capaces de cubrir grandes superficies a la vez que proporcionan rigidez al armazón durante el levantamiento. En los cantos del OSB, se dispone una película que es especialmente diseñada para brindarle protección contra la humedad por lo que no es necesario de ningún tipo de cuidado especial sino simplemente proveerlo del cuidado que se le brinda a cualquier tipo de tablero (LP Building Solutions, 2019).

Los tableros OSB, son un producto relativamente nuevo, pero las propiedades con las que cuentan les permiten competir con los tableros contrachapados a pesar de que su costo es mucho menor. Esto se debe a que en la producción de tableros OSB se utiliza madera de menor calidad (Rivera C. , 2018)

Para la producción de tableros de virutas orientadas, es necesario la utilización de partículas largas y anchas cuyas dimensiones puede ser aproximadamente de 75 mm de largo por 25 mm de ancho, a razón que en el virutado se utilizan trozos. Se debe recalcar que al

utilizar partículas de buena calidad obtenidas de madera descortezada y con un contenido de humedad de aproximadamente el 60% se puede lograr excelentes propiedades en los tableros (Vargas, 2020)

Es recalable también que su fabricación produce un bajo impacto ambiental debido a que se utiliza tecnología que permite un control adecuado de las emisiones al medio ambiente, además, los adhesivos como el fenol formaldehído y MDI que se utilizan son completamente polimerizados durante el proceso de prensado con lo cual se previene futuras emisiones de gases perjudiciales para la salud (Flores & Canchucaya, 2017)

Con respecto a sus aplicaciones industriales debido a su alta resistencia mecánica, su versatilidad, la factibilidad para ser trabajados, su bajo costo y la no emisión de formaldehído lo convierte en una excelente opción para ser utilizados en la construcción con respeto a la madera sólida y tableros contrachapados (Zúñiga, 2010).

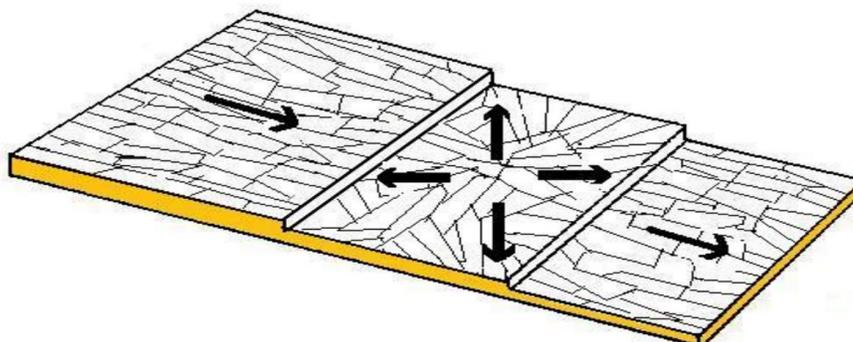
Estos paneles se usan comúnmente en la construcción de techumbres, muros y pisos, de igual manera debido a sus características se han convertido en uno de los productos derivados de la madera más utilizados para uso estructural (Torres, 2017).

### ***Clasificación de los tableros OSB según grado***

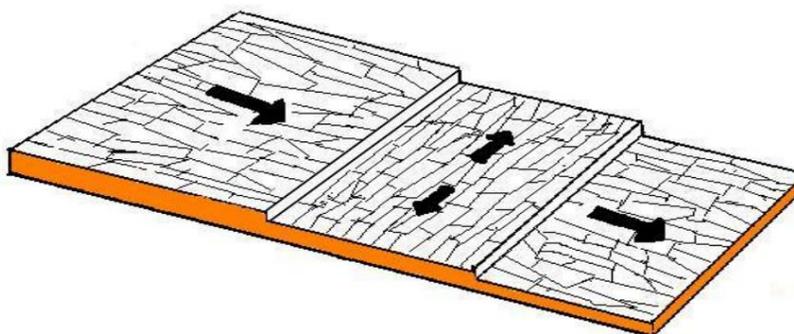
Según la Structural Board Association, existen dos grados de Tableros OSB: el O-1 y O-2 y un tercer grado al azar R-1(Waferboard).

#### **Grado O-1 “Caras alineadas y centro al azar”:**

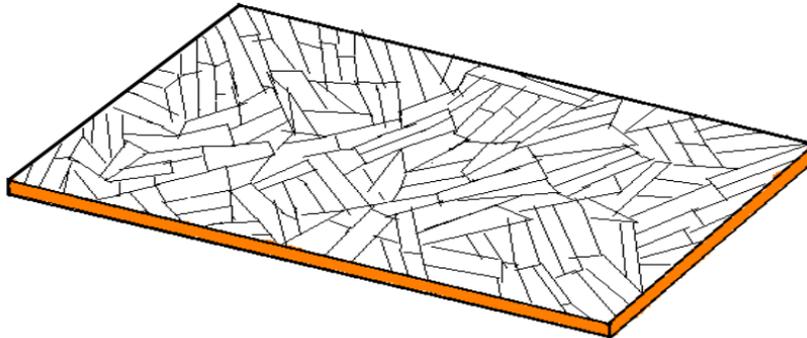
En su parte exterior las capas de las superficies están constituidas por virutas alineadas y orientadas hacia la dirección mayor del tablero, mientras que en la parte centro o interior las virutas se orientan de forma perpendicular o al azar (Carrasco, 2012).

**Figura 6***Tablero OSB Grado O-1**Nota:* Recuperado de (Carrasco, 2012)**Grado O-2 “Caras alineadas y centro orientado”:**

En las capas exteriores las virutas se orientan de forma paralela a la mayor dimensión del tablero, mientras que en las capas interiores las virutas se disponen de forma paralela a la dirección menor del tablero (Kaiser, 2019)

**Figura 7***Tablero OSB Grado O-2**Nota:* Recuperado de (Carrasco, 2012)**Grado R-1 “Virutas al azar”:**

Este tipo de tablero se podría decir que es la base desde donde se definió propiamente los tableros OSB, debido a que la orientación de las virutas no sigue ningún tipo de patrón, a la vez que tienen una menor utilidad (Carrasco, 2012)

**Figura 8***Tablero OSB Grado R-1*

*Nota:* Recuperado de (Carrasco, 2012)

Cabe recalcar que la resistencia de los tableros OSB, está estrechamente relacionado por las virutas constantes de madera, por el entretrejido que se generen con las hojuelas largas y por el grado de orientación de dichas capas en la superficie, además los aditivos e impermeabilizantes que se utilicen para unir las capas proporcionaran una mayor fuerza interior, rigidez y una gran resistencia a la humedad.

***Muros de paneles OSB***

La empresa Louisiana Pacific S.A. (LP), es la principal productora de paneles OSB para viviendas en América, a su vez, esta empresa produce diferentes tipos de tableros OSB para diferentes ámbitos de la construcción en general, de donde se tiene el tablero "LP OSB" mismo que es el más utilizado como elemento estructural de las viviendas.

**Figura 9***Paneles LP OSB*

*Nota:* Recuperado de (LP Building Solutions, 2019)

Las dimensiones de los tableros LP OSB, siguen un formato de fabricación estándar que son de 1220 mm de ancho, 2440 mm de largo y sus espesores pueden variar entre 7.9 mm y 28.5 mm, siendo los más utilizados los espesores de 9.5 mm, 11.1mm y 15.1mm. Con respecto a su densidad varía dependiendo de cada producto, esta diferencia se presenta debido a la especie de madera utilizada y de las condiciones dadas durante el proceso de producción (LP Building Solutions, 2019).

Con respecto al uso que se le puede dar a los tableros LP OSB, destacan su utilidad en la construcción de techumbres, muros y pisos, tanto para la construcción habitacional como la comercial de hasta 4 pisos, además de poder ser utilizados en las ampliaciones y remodelaciones de viviendas (Da Rocha & Matuti, 2018).

El uso de tableros LP OSB en la estructuración de muros posibilita la eliminación de cadenas y diagonales, lo cual resulta en un ahorro de hasta el 50% en materiales y mano de obra, lo que permite el reemplazo de muros de hormigón y mampostería. Por otro lado, debido a la cara rugosa que poseen los tableros es ideal para la adherencia de diferentes tipos de revestimientos ya sean cementicios, elastoméricos, vinílicos, enchape de piedra o ladrillo,

poliméricos, entre otros, los cuales proveen de protección y a su vez de un excelente acabado exterior a las viviendas. (LP Building Solutions, 2019).

### **Figura 10**

*Muros con tableros LP OSB*



*Nota:* Recuperado de (LP Argentina, 2022).

Los tableros LP OSB son una alternativa confiable para sistemas de muros o marcos de madera, debido que se puede formar un sistema rígido tipo diafragma, el cual es capaz de resistir solicitaciones comunes como cargas estáticas, vientos fuertes y deformaciones, a la vez que proporcionan una gran resistencia térmica y control acústico. Debido a las características de peso y densidad que posee la madera se puede tener un mejor comportamiento que otras estructuras al ser expuestas a fuerzas sísmicas o fuerzas de viento (Carrasco, 2012).

#### ***Estructura general de los muros de madera.***

La definición de un diafragma especifica que es un elemento estructural delgado que es capaz de resistir solicitaciones de cizalla y a su vez posee rigidez capaz de limitar las deformaciones de la estructura, se puede constituir diafragmas horizontales y verticales (Vivanco, 2018).

Las edificaciones modernas construidas con madera están constituidas por diafragmas, los cuales actúan como elementos estructurales. La madera al estar dispuesta de forma vertical

trabaja como muros de corte, mientras que al estar colocados de forma horizontal trabajan como diafragmas de piso lo que provee de una rigidez completa a la estructura (Patiño, 2014).

Un diafragma vertical o comúnmente conocido como muro de corte es capaz de soportar cargas verticales y los empujes horizontales causados por el viento o por un sismo. Los muros están contruidos por tres partes que son el bastidor, el revestimiento, y los elementos de unión entre bastidor y revestimiento, por otro lado, la construcción de los diafragmas verticales se lo realiza de un bastidor con refuerzos de diagonales y de transversales para obtener una mayor rigidez y la utilización de un recubrimiento de entablado (Ávila, 2019)

Por otro lado, los diafragmas rigidizados con placas están compuestos de un bastidor con pies derechos y soleras, al cual se adiciona el tablero de recubrimiento que rigidiza la estructura (Calderón & Paz, 2017).

Como desventajas que tienen los diafragmas tradicionales con respecto a los diafragmas rigidizados por placas es que el primero se comporta de manera distinta dependiendo del sentido de la carga solicitante, además que se necesita mayor tiempo y mayor volumen de materia prima para su construcción, lo cual no ocurre con los diafragmas rigidizados con placas (Montaño, berwart, & Santa María, 2021)

### **Cargas que actúan sobre un muro**

Las cargas a las que se encuentra sometida la estructura se pueden dividir en:

#### **Cargas Verticales:**

Estas se componen de la sobrecarga de la estructura que es soportada por los muros que a su vez pueden provenir de los techos y pisos superiores, la cual se suma al peso propio de la estructura (Patiño, 2014).

#### **Cargas Horizontales:**

Estas solicitaciones son generadas eventualmente por viento o por fuerzas sísmicas. Para determinar las cargas de viento se lo realiza mediante un estudio de la localidad,

verificando donde se encuentra implantada la estructura y el grado de exposición. Por otro lado, para determinar las cargas producidas por sismo se lo realiza de acuerdo a la ubicación geográfica de la estructura, es importante recalcar que las fuerzas sísmicas son directamente proporcionales al peso de la estructura, lo que constituye una gran ventaja para las construcciones de madera con respecto a construcciones convencionales de hormigón y acero (Montaño, berwart, & Santa Mária, 2021)

En las estructuras de madera el esfuerzo de corte producido por solicitaciones causadas por sismo o por viento son soportadas por diafragmas verticales que arriostran lateralmente a la estructura y a su vez se encargan de transmitir estos esfuerzos hacia la cimentación (Calderón & Paz, 2017).

### **Comportamiento estructural.**

El comportamiento de los muros con tableros de recubrimiento ha sido la causa para una amplia gama de estudios, tomando una mayor relevancia en países como el nuestro, que se encuentra sometido a diversos eventos sísmicos (Catalán, 2016).

Los diafragmas horizontales sean estos pisos o techumbre son capaces de resistir los esfuerzos verticales generados por la sobrecarga y el peso propio. Los diafragmas verticales tienen como función el servir de apoyo de los diafragmas horizontales y son capaces de resistir los esfuerzos laterales como un muro de corte (Ordoñez & Yessenia, 2016)

Las cargas horizontales producen efectos en los muros mucho más complejos que los producidos por corte puro, a razón de que provocan tensiones que son producidas en la unión clavada tablero-bastidor y en las placas de recubrimiento, se produce también flexión en los pies derechos y soleras del bastidor además del momento volcante que afecta al todo el panel (Parra, 2017)

Según (Vasqéz, Campos, & Elgueta, 2019), los muros de corte al trabajar conjuntamente con otros elementos, son propensos a tener diferentes comportamientos, los cuales se encuentran ligados a varios factores como:

- Carga vertical proveniente de la descarga de elementos superiores.
- Interacción con muros perpendiculares.
- Continuidad entre paneles adyacentes producto de la existencia de una solera superior de amarre.

Los factores antes mencionados se encargan de aumentar la capacidad resistente del muro, debido a que este no actúa de forma aislada y al implementarse otros elementos, ayudan a que la estructura puede ser capaz de resistir las solicitaciones a corte. Debido a este comportamiento combinado la carga vertical contrarresta el momento volcante, además los muros perpendiculares impiden el desplazamiento lateral del muro que se encuentre solicitado (Vasqéz, Campos, & Elgueta, 2019)

Para una representación real de los muros es necesario que estos cuenten con elementos de amarre entre paneles adyacentes, los cuales se encarguen de proveer de continuidad al muro, en el caso de que no se implementen estos elementos darán lugar al caso más desfavorable desde el punto de vista del diseño, es decir, el muro se comportara de una forma aislada (Ordoñez & Yessenia, 2016)

Según (Aguilera, 2020), varios estudios han logrado determinar que las deformaciones alcanzadas por un muro de madera cuando es sometido a cargas laterales es la suma de las siguientes deformaciones locales :

- Deformación de la unión clavada revestimiento-bastidor.
- Deformación de la unión clavada entre elementos del bastidor.
- Deformación de los elementos del sistema de anclaje.
- Deformación de pies derechos y soleras.
- Deformación por corte del tablero de recubrimiento.

Se ha podido constatar que las deformaciones locales que más contribuyen a la deformación horizontal total, son producidas en las conexiones clavadas, en la conexión

bastidor-tablero de recubrimiento y por las deformaciones que se producen en las soleras y pies derechos (Catalán, 2016).

### **Constantes elásticas**

En la actualidad se cuenta con una amplia gama de materiales que pueden ser utilizados para propósitos de ingeniería, cada uno de estos poseen propiedades mecánicas intrínsecas de elasticidad, dureza, resistencia a la deformación, entre otras. La relación que existe entre la fuerza que es capaz de soportar un material y la deformación asociada a esa fuerza en las direcciones de análisis son las llamadas constantes elásticas (Torres, 2017).

La mayor parte de materiales presentan propiedades mecánicas iguales en cualquier dirección que sean analizados, debido a esta cualidad son denominados materiales isotrópicos, por otro lado, se tiene los materiales anisotrópicos que son los que presentan propiedades mecánicas que varían según la dirección en los que sean analizados (Balart & Quiles, 2019).

Si se tiene un material cuyas propiedades son únicas e independientes en las tres direcciones de análisis son conocidos como materiales ortotrópicos, este último es el caso de la madera, debido a que se idealiza el sólido haciendo coincidir cada dirección ortogonal con un plano de la madera los cuales son radial, longitudinal y tangencial (López & Mesías, 2020)

### ***Módulo de Elasticidad***

El módulo de elasticidad de un elemento estructural se considera como la medida de resistencia a un cambio de forma o de tamaño y es extremadamente importante el conocer esta propiedad, ya que mediante esta se podrá determinar el comportamiento que pueden tener los materiales como son los paneles OSB. Si se tuviese un valor bajo de módulo de elasticidad indicará que se tendrá un mayor grado de deformación, este parámetro es importante para conocer el comportamiento estructural de un material (Casihualpa, 2021).

Para determinar el módulo de elasticidad de cualquier material existen diversos métodos entre los que se distinguen los métodos estáticos y dinámicos, si se desea determinar

esta constante elástica por métodos estáticos existen técnicas estandarizadas como la ASTM D3043 “Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure”, cabe recalcar que esta norma esta adecuada para la determinación del módulo de elasticidad para materiales en base a madera (Torres, 2017).

### ***Módulo de Corte***

Con respecto al módulo de corte de un elemento de madera este hace referencia a la capacidad de deformación que puede tener un cuerpo al ser sometido a esfuerzos cortantes, y es de vital importancia ya que permite definir el comportamiento de una estructura ante esfuerzo cortantes y los desplazamientos en el plano (Torres, 2017).

### ***Contenido de humedad***

Se define el contenido de humedad como la masa de agua contenida en una pieza de madera expresada como porcentaje de la masa de la pieza anhidra. El peso anhidro se lo puede obtener después de colocar la madera en un horno a una temperatura de 100°C hasta que se obtenga un peso constante (López & Mesías, 2020).

Un árbol recién cortado, puede contener una cantidad importante de agua en su madera la cual depende de la época del año, la región de procedencia y de la especie forestal de la que se trate (Revilla, 2021)

Los diferentes puntos de humedad de la madera no solo influyen en los hinchazones y mermas sino también influyen en su peso resistencia, dificultada de corte, aserrado y acabado, así también como en la fluencia y la deformación de las piezas; a pesar que con la reducción del contenido de humedad las propiedades mecánicas crecen algunas de ellas como la tenacidad o la resistencia al choque decrecen. La influencia es tan importante que los valores de rigidez y resistencia se establecen en relación con la humedad (Gómez, 2019).

### **Densidad de la madera**

La densidad es el cociente entre la masa y el volumen de la madera y está estrechamente ligada con la humedad, es decir, si la humedad crece la densidad también crece (Paredes & Bocanegra, 2018)

Por lo general las maderas que cuentan con una mayor densidad son más durables que las maderas livianas, por otro lado, las maderas densas son muchas más difíciles para ser trabajadas, secadas e inmunizadas (Ruíz, 2019)

También se conoce que las maderas de densidad alta tienen la presencia de células con lumen pequeño y son de pared celular gruesa, mientras que lo contrario se presenta en maderas livianas en donde por lo general las células presentan muchos espacios porosos, a la vez que presentan buenas características acústicas y aislantes (Gómez, 2019)

La variación de la densidad de la madera depende en gran medida de la especie y de la edad de los árboles, además la densidad está estrechamente relacionada con la anatomía de la madera, particularmente depende del espesor de la pared celular de las fibras (Rivera J. , 2014).

La densidad de la madera varía durante la vida de la planta y entre individuos de una misma especie. Además, las ramas y las partes exteriores del tronco tienden a presentar densidades de madera más bajas que la médula del tronco (Paredes & Bocanegra, 2018)

La densidad cumple un rol primario dentro de las características de la madera ya de ella depende en gran parte su adaptabilidad a eventuales tratamientos y modificaciones, como los posibles usos que se le puede dar (Gómez, 2019).

### **Propiedades mecánicas**

Se define las propiedades mecánicas de la madera como aquellas con la aptitud y capacidad para resistir cargas externas pero se excluye los esfuerzos debidos a las tensiones internas ocasionados por los cambios de la humedad, estas propiedades pueden clasificarse de acuerdo al comportamiento de la madera, la acción de una carga y al plano de corte en que

aplica, así también de acuerdo a las modalidades de las cargas sobre las muestras (estáticas o dinámicas) y de su tiempo de aplicación, razón de esto se podría dividir a las mismas en resistencia estática y resistencia dinámica (Rivera J. , 2014).

### ***Flexión de la madera.***

La flexión de la madera hace referencia a la capacidad portante que esta provee cuando este elemento está sometido a fuerzas transversales (Vásquez & Elgueta, 2017)

### ***Módulo de Ruptura (MOR).***

El módulo de ruptura corresponde a la tensión unitaria que es capaz de soportar un material antes de que se produzca la falla, se determina mediante el incremento de una carga sobre un elemento hasta provocar la rotura del mismo (Rivera J. , 2014).

A continuación, se presenta una clasificación de acuerdo al ensayo de flexión estática en madera.

## **Figura 11**

### *Clasificación del módulo de ruptura*

<b>Flexión Estática - Modulo de Ruptura (Kg/cm2)</b>	
MOR	Clasificación
< 500	Muy bajo
500 – 950	Bajo
951 – 1220	Medio
1221 – 1750	Alto
> 1750	Muy alto

*Nota:* Recuperado de (LP Argentina, 2022).

Es importante resaltar que mientras menor sea el módulo de ruptura la madera tiene menor capacidad resistente, por lo cual es menos utilizada para fines estructurales (Escobar & López, 2021).

## **Normativa relacionada**

### ***ASTM D 4442 – 92-Contenido de humedad***

Esta norma abarca los métodos de ensayo para la determinación del contenido de humedad (MC) de la madera maciza, la chapa y otros materiales a base de madera, incluidos los que contienen adhesivos y aditivos químicos. Los métodos de prueba para medir el contenido de humedad se dividen en procedimientos primarios (A) y secundarios (B a D) (ASTM D4442, 2003):

Método A: Método primario de secado al horno

Método B: Método secundario de secado al horno

Método C: método de destilación (secundario)

Método D: otros métodos secundarios.

### ***Norma ASTM D2395-2-Densidad específica***

Métodos de ensayo estándar para determinar la gravedad específica de la madera y los materiales a base de madera.

La gravedad específica es el peso de cualquier volumen dado de una sustancia dividido por el peso de un volumen igual de agua. El peso como el volumen de la madera varían con la cantidad de humedad contenida en la misma, la gravedad específica aplicada a la madera es una cantidad indefinida a menos que se especifiquen claramente las condiciones en las que se determina (ASTM D2395, 2017).

La gravedad específica de la madera generalmente se basa en el peso cuando se seca al horno, pero el volumen puede ser el de la condición seca, parcialmente seca o verde. La cantidad de humedad retenida en cualquier condición de equilibrio es proporcional al peso seco de la muestra, y por esta razón el contenido de humedad se expresa normalmente como un porcentaje del peso seco al horno de la madera (ASTM D2395, 2017).

***Norma ASTM D 2718 – 00-Corte en paneles estructurales***

Métodos de ensayo estándar para paneles estructurales, en los cuales a través del espesor se puede determinar tanto la resistencia al cizallamiento como el módulo de rigidez. Principalmente, las pruebas miden la resistencia de cizalla del eje principal (cizalla rodante) desarrollada en el plano del panel (ASTM D2719, 2001).

Este método de ensayo cubre la determinación del módulo de corte de los paneles estructurales a base de madera asociados con la distorsión por corte en el plano de los paneles. El método es aplicable a todo tipo de paneles estructurales a base de madera. La dirección u orientación de la fibra de las capas, laminaciones o capas individuales debe ser paralela o perpendicular al borde de la muestra de ensayo. Si las capas o laminaciones son de diferentes materiales o propiedades elásticas, el método da el módulo de corte efectivo (ASTM D2719, 2001).

Los paneles estructurales a base de madera incluyen madera contrachapada, tableros de obleas, tableros de virutas orientadas, compuestos de chapa y capas a base de madera.

***Norma ASTM D 3043 – 00-Ensayo a flexión***

Estos métodos de prueba determinan las propiedades de flexión de las tiras cortadas de paneles estructurales o paneles de hasta 4 por 8 pies de tamaño (ASTM D3043, 2017).

***Norma ASTM D 3500 – 90-Ensayo a tracción***

Estos métodos de prueba cubren la determinación de las propiedades de tracción de los paneles estructurales realizados de madera o derivados (ASTM D3500, 2003).

***Norma ASTM D 3501 – 94-Ensayo a compresión***

Estos métodos de prueba cubren la determinación de las propiedades de compresión de los paneles estructurales a base de madera (ASTM D3501, 2016).

## **Modelación analítica**

Mediante el uso de un software comercial de ingeniería estructural con el cual se puede analizar cualquier tipología de estructuras, mediante la definición de diferentes tipos de estados y asignación de cargas, asignando materiales como secciones para ejecutar la modelación de diferentes casos de estudio (Pontón, 2021).

Mediante los software de análisis estructural se puede crear modelos y realizar el análisis de los mismos, poder revisarlos y optimizar cada elemento de una forma más precisa debido a que su interfaz presenta el modelamiento de una manera gráfica, además el programa tiene la capacidad de dar solución a las necesidades que el usuario requiera para el análisis y diseños de elementos tipo Frame como de elementos tipo Shell (Calderón & Paz, 2017).

El software a ser utilizado puede realizar análisis mediante el uso del método de elementos finitos, el cual tiene su principio básico en el dividir un elemento en elementos mucho más pequeños y con ello poder obtener respuestas mucho más confiables (Ayala & Vallejos, 2020)

Para los muros a base de madera se modelará a los tableros OSB como elementos Shell tipo membrana mientras que los bastidores serán modelados como elementos tipo Frame (Calderón & Paz, 2017).

Los elementos tipo Frame se componen de un nodo inicial y un nodo final, otra de las características es que poseen ejes locales que se describen a continuación:

Eje 1: se representa mediante una flecha de color roja y se orienta desde el nodo inicial hacia el nodo final a la vez que es axial al elemento.

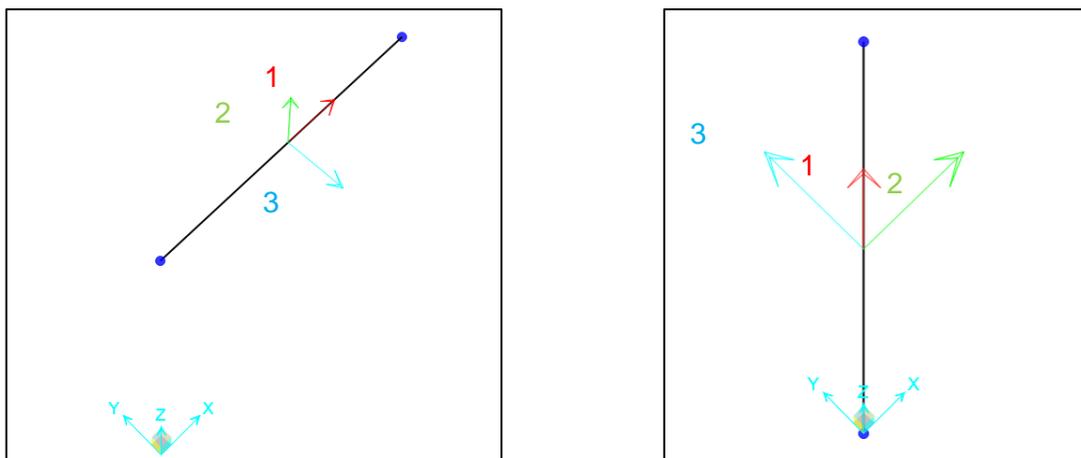
Eje 2: se representa mediante una flecha de color verde y es ortogonal al eje 1 y tiene por defecto la dirección del eje Z

Eje 3: este último se representa mediante una flecha color cian y resulta de la implementación de la regla de la mano derecha.

En la figura 12 se indica la representación de los ejes globales (X,Y y Z) y locales (1,2 y 3) tanto para vigas (figura 12a) y columnas (figura 12b).

### Figura 12

*Ejes globales y locales utilizados en el software comercial*



a) Ejes globales y locales en vigas

b) Ejes globales y locales en columnas

Con respecto a los apoyos se puede asignar diferentes tipos de restricciones, el programa provee de seis grados de libertad por nudo y el tipo de restricción elegido será de acuerdo al requerimiento de la estructura real (Martín, 2021).

También se puede utilizar las restricciones que buscan la representación el comportamiento de un cuerpo rígido para conectar diferentes partes de la estructura y a su vez imponer condiciones de simetría, para representar una unión se necesita de dos o más nodos restringidos, algunos de los tipos de restricción que incluyen los programas son diaphragm, plate, rod, beam y body (Martín, 2021).

Body: permite que los nodos restringidos se comporten como un cuerpo rígido, es decir, los desplazamientos son relativos. Se utiliza para:

- Modelar uniones rígidas entre columnas y vigas.
- Unión entre vigas modeladas con elemento Frame y placas modeladas utilizando el elemento Shell (Martín, 2021).

Cabe destacar que los modelos que se pretende analizar buscan representar el comportamiento de un muro tomando en cuenta las propiedades de los materiales a utilizar, así como los elementos de los cuales se constituye el muro, para lo cual, es requisito indispensable obtener en primer lugar las propiedades físico mecánicas de los paneles LP OSB, además de las normativas vigentes.

## Capítulo III

### Determinación de las propiedades Físico - Mecánicas de prototipos de tableros estructurales

#### Elaboración de probetas para ensayos

Una vez que se ha definido la normativa con la cual se realizará cada ensayo se prepara las muestras según lo establecido en las mismas, este proceso parte de la adquisición del material. Los paneles LP OSB son tableros producidos en Chile por la empresa LP Building Products líder mundial en fabricación de tableros tipo OSB. Los tableros que se han utilizado en esta investigación se han verificado por la asociación APA (Engineered Wood Association) la cual es una agencia externa de calidad encargada de certificar el 95% de los tableros estructurales para viviendas en Estados Unidos y Canadá.

#### Figura 13

*Panel LP OSB utilizado*



En este caso se ha utilizado un panel de 9.5 mm de espesor. Las muestras para cada ensayo se realizaron en un aserradero con la maquinaria necesaria para realizar los cortes.

**Figura 14**

*Corte de Panel OSB*

**Figura 15**

*Elaboración de matrices para los cortes de muestras*



## Figura 16

### *Corte y elaboración de muestras*



Cada muestra se realizó en función de la normativa correspondiente. Inmediatamente cortadas se procedió a quitar astillas y almacenar en un ambiente seco previo al inicio de los ensayos establecidos.

### **Caracterización física y mecánicas de las probetas**

#### ***Contenido de humedad***

La normativa utilizada para la obtención del contenido de humedad en materiales a base de madera es la norma ASTM D4442, esta describe métodos de ensayos mediante procedimientos primarios como el método A y secundarios como el método B, para la presente investigación se determinó el contenido de humedad mediante la utilización del método secundario de secado al horno (Método B) a razón que se puede obtener una mayor precisión (ASTM D4442, 2003).

El contenido de humedad generalmente expresada en porcentaje (%), es una de las variables más importantes que afectan a las propiedades de los materiales a base de la madera.

#### **Método B: Secado al horno (Secundario)**

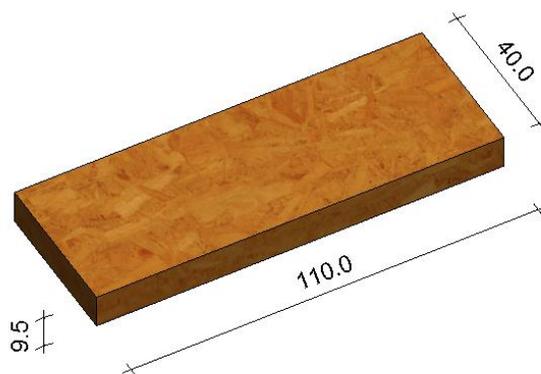
#### **Materiales**

- Horno: Se utilizará un horno que pueda mantener  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  cerca del punto final de secado.
- Balanza: la sensibilidad será mínimo del 0.1% de la masa nominal en horno de la muestra.
- Muestra: Las muestras a ensayar tienen un espesor de 9.5mm, y se deben realizar un mínimo de 8 muestras, para la presenta investigación se utilizó 15 probetas de las siguientes dimensiones 110x40x9.5mm.

En la figura 17 se presenta una vista isométrica de la probeta con sus respectivas dimensiones que será utilizada en el ensayo de contenido de humedad.

**Figura 17**

*Probeta para el ensayo de contenido de humedad*



### Cálculos

Para calcular el contenido de humedad se necesita utilizar la siguiente formula.

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_f} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$W_i$ =peso inicial o peso húmedo

$W_f$ =peso final o peso seco

MC= contenido de humedad, %

### Preparación del material

De acuerdo a lo expuesto en la norma ASTM 4442-D, se procedió a cortar las muestras con las dimensiones antes indicadas del panel OSB, para este ensayo se elaboraron un total de 15 muestras, en la tabla 1 se presenta las dimensiones de cada una de las muestras.

**Tabla 1**

*Muestra seleccionada para el ensayo de contenido de humedad*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>
MC1	110.92	40.51	9.68
MC2	111.14	40.59	9.86
MC3	110.85	40.42	9.84
MC4	111.07	40.61	9.72
MC5	111.11	40.59	9.75
MC6	111.25	40.5	9.64
MC7	110.99	40.4	9.65
MC8	111.17	40.73	9.61
MC9	110.98	40.42	9.64
MC10	110.82	40.33	9.49
MC11	110.94	40.63	9.78
MC12	110.97	40.57	9.68
MC13	110.91	40.62	9.61
MC14	110.79	40.51	9.71
MC15	110.88	40.65	9.5

### Identificación de la muestra

Se procedió a codificar las muestras utilizadas en el ensayo de contenido de humedad con el código MC y adicional el número de muestra cómo se puede apreciar en la figura 18.

## Figura 18

*Muestras para el ensayo de contenido de humedad*



### Protocolo de ensayo

Los ensayos de contenido de humedad se los realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, en un horno de marca Quincy, con una capacidad de 0.085 m<sup>3</sup>, un voltaje de 110V, un termómetro para comprobar la temperatura del horno, por otro lado, para contar con una correcta medición de la geometría de las muestras se utilizó un calibrador electrónico Fowler, cuya precisión es de 0.01mm y por último se utilizó una balanza de marca Shimadzu de precisión de 0.1g.

A continuación, el detalle del proceso que se llevó a cabo para realizar el ensayo de contenido de humedad.

- Se determinó que en las muestras no existan fallas visibles ni imperfecciones de acuerdo a lo que especifica la norma ASTM 4442-D.
- Se procedió a medir las dimensiones tanto largo (L), ancho (w) como espesor (e) de cada una de las muestras.
- Con la ayuda de la balanza se pesó y registro los datos de cada una de las muestras en su estado húmedo.

- Para continuar se colocaron las muestras en el horno procurando que la temperatura se mantuviera en un rango de  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- Una vez realizado los pasos previos se espera 24 horas para volver a pesar cada una de las muestras y se registra estas medidas, este paso se realiza cada 24 horas hasta que el peso de cada una de las muestras se mantenga constante o se tenga una variación de  $\pm 1\%$

### Análisis de los resultados

En la tabla 2 podemos observar los valores de los pesos de cada una de las muestras tanto el peso húmedo o inicial y el peso seco al horno o final, al realizar los cálculos se obtiene el contenido de humedad (MC).

**Tabla 2**

*Resultados de contenido humedad de cada muestra.*

Muestra	Peso húmedo $W_i$ (g)	Peso seco al horno $W_f$ (g)	Contenido de humedad MC (%)
MC1	28.99	26.21	10.61
MC2	28.3	25.64	10.37
MC3	25.12	22.81	10.13
MC4	32.1	29.05	10.50
MC5	29.54	26.93	9.69
MC6	31.38	28.54	9.95
MC7	28.81	26.12	10.30
MC8	28.13	25.61	9.84
MC9	29.57	26.85	10.13
MC10	27.65	25.05	10.38
MC11	30.08	27.24	10.43
MC12	27.67	25.07	10.37
MC13	28.53	25.88	10.24
MC14	29.46	26.66	10.50
MC15	28.21	25.51	10.58
<b>Promedio</b>	28.90	26.21	<b>10.27</b>
<b>Desv. Estandar</b>	1.65	1.49	0.27
<b>CoV</b>	0.06	0.06	0.03

Como se puede notar en la tabla 2, se tiene un rango de contenido de humedad entre 9.69% y 10.68%, de lo cual se puede obtener un contenido de humedad promedio de 10.27%

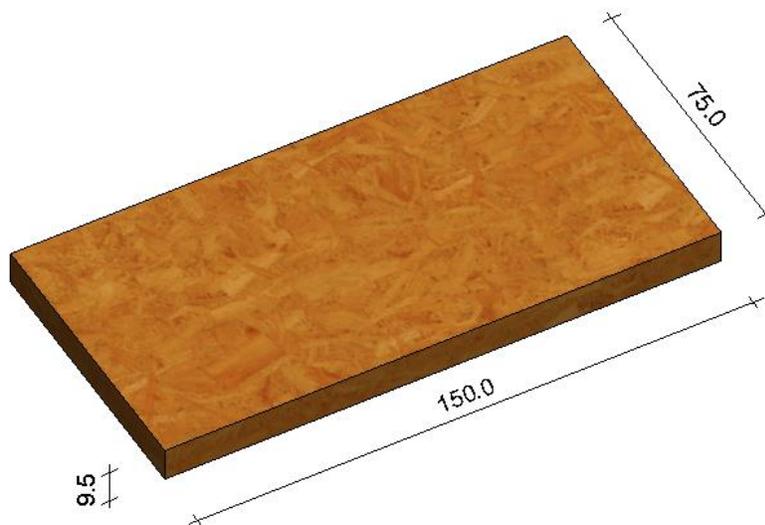
### ***Densidad específica***

La norma para determinar la densidad específica para materiales a base de la madera es la ASTM D2395, con la que se obtienen resultados generalmente precisos para especímenes de diferentes tamaños, formas y con distinto contenido de humedad (ASTM D2395, 2017).

En el presente estudio se utilizó el método A, donde se expresa que las muestras deben tener una forma regular con esquinas en ángulo recto para la determinación del volumen mediante medición lineal, además que deben contar con superficies lisas, para este ensayo se realizó 15 probetas de dimensiones 150x75x9.5 mm como se puede apreciar en la figura 19.

### **Figura 19**

*Probeta para el ensayo de densidad específica*



### **Procedimiento**

- Medición: se deberá realizar un mínimo de tres mediciones tanto en longitud (L), ancho (w) y en espesor (e).
- Peso: determinación del peso (W) en el momento del ensayo.

- Contenido de humedad: se determina el contenido de humedad (MC) para conocer la descripción de la base sobre la cual se calcula densidad específica.
- Preparación de la muestra: determine el peso inicial ( $W_i$ ), de la muestra con contenido de humedad.
- Secado: seque al horno la muestra con contenido de humedad y determinar el peso seco al horno ( $W_f$ )

### Cálculos

#### Densidad específica

$$d = K * \frac{W_f}{\left[1 + \frac{MC}{100}\right] L * w * e} \quad (2)$$

Donde:

$d$ = densidad específica

$W$ =peso seco al horno, g

$MC$ =contenido de humedad, (%) (ver formula 1)

$L$ = longitud de la muestra, mm

$w$ =ancho de la muestra, mm

$e$ =espesor de la muestra, mm

$K = 1000$  cuando el peso está en g y el volumen está en  $\text{mm}^3$

#### Peso específico

$$\gamma = \frac{W_f}{L * w * e} \quad (3)$$

Donde:

$\gamma$ = peso específico

$W$ =peso seco al horno, g

$L$ = longitud de la muestra, mm

$w$ =ancho de la muestra, mm

e=espesor de la muestra, mm

### Preparación de la muestra

Una vez determinadas las dimensiones de las muestras para el ensayo de densidad según lo expuesto en la norma ASTM D2395 se procedió a cortar el panel OSB con una sierra circular de acuerdo a las dimensiones requeridas, se preparó un total de 11 probetas, y se las codifico con la letra D, como se puede apreciar en la figura 20.

### Figura 20

*Probetas para el ensayo de Densidad*



Además, en la tabla 3 se presenta las dimensiones de cada una de las probetas que se utilizaron en el ensayo.

**Tabla 3***Muestras seleccionadas para el ensayo de densidad*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>
D1	150.39	75.77	9.59
D2	150.28	75.58	9.77
D3	150.42	75.53	9.48
D4	150.1	75.69	9.76
D5	150.08	75.67	9.46
D6	150.42	75.46	9.64
D7	150.3	75.44	9.78
D8	150.3	75.48	9.73
D9	150.3	75.69	9.65
D10	150.46	75.5	9.69
D11	150.5	75.52	9.91

**Protocolo de ensayo**

El ensayo de densidad es muy similar al ensayo de contenido de humedad a razón de que se utilizan los mismos materiales para la determinación de la densidad del material.

A continuación, el detalle del proceso que se llevó a cabo para realizar el ensayo de densidad.

- Se determinó que en las muestras no existan fallas visibles ni imperfecciones de acuerdo a lo que especifica la norma ASTM D2395.
- Se procedió a medir las dimensiones tanto largo (L), ancho (w) como espesor (e) de cada una de las muestras.
- Con la ayuda de la balanza se pesó y registro los pesos de cada una de las muestras en su estado húmedo.
- Para continuar se colocaron las muestras en el horno procurando que la temperatura se mantuviera en un rango de  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- Una vez realizado los pasos previos se espera 24 horas para volver a pesar cada una de las muestras y se registra estas medidas, este paso se realiza cada

24 horas hasta que el peso de cada una de las muestras se mantenga constante o se tenga una variación de  $\pm 1\%$

- Se procede a realizar el cálculo de la densidad del material mediante la utilización de la fórmula expuesta en el procedimiento.

### **Análisis de resultados**

En la tabla 4 se presenta los resultados del ensayo de densidad en cada una de las muestras, al utilizar la fórmula para el cálculo de la densidad, se tiene como resultado una densidad seca al horno promedio de 597.27 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 4**

*Resultados del ensayo de densidad específica y peso específico*

<b>Muestra</b>	<b>Peso humedo Wi (g)</b>	<b>Peso seco al horno Wf (g)</b>	<b>Contenido de humedad MC (%)</b>	<b>Densidad seca al horno d</b>	<b>Peso específico <math>\gamma</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
D1	73.32	66.27	10.64	0.55	606.43
D2	71.48	64.74	10.41	0.53	583.40
D3	68.84	62.52	10.11	0.53	580.48
D4	74.38	67.33	10.47	0.55	607.21
D5	71.30	65.02	9.66	0.55	605.21
D6	73.66	66.97	9.99	0.56	612.04
D7	68.55	62.12	10.35	0.51	560.19
D8	71.97	65.51	9.86	0.54	593.48
D9	74.63	67.77	10.12	0.56	617.32
D10	69.90	63.34	10.36	0.52	575.42
D11	78.24	70.82	10.48	0.57	628.76
<b>Promedio</b>	72.39	65.67	10.22	0.54	597.27
<b>Desv. Estandar</b>	2.85	2.55	0.30	0.02	20.49
<b>CoV</b>	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03

### **Ensayo a flexión**

Una vez realizado el ensayo a flexión se puede determinar tanto el módulo de elasticidad del material como el módulo de ruptura, a continuación, se presenta el procedimiento llevado a cabo para determinar estas propiedades mecánicas.

### Módulo de elasticidad

Para la determinación del módulo de elasticidad de materiales a base de la madera se utilizó la norma ASTM D-3043. En este caso se utilizó el método A, en donde expresa que se realiza la prueba a flexión en el punto central de muestras pequeñas y uniformes.

#### Método A: prueba de flexión en el punto central

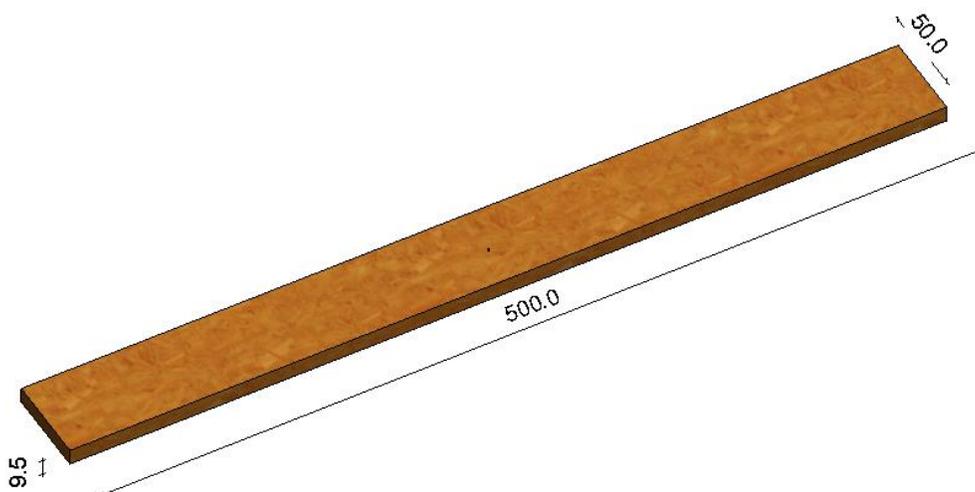
Se utiliza la maquina SHIMADZU, para aplicación y medición de una carga en el tramo medio de la muestra y se mide la deflexión resultante a mitad del tramo. La prueba se realiza a una velocidad constante hasta que se registren los datos necesarios o hasta que se produzca la falla de la muestra (ASTM D3043, 2017).

**Muestra de prueba:** la muestra será rectangular en su sección transversal, donde su profundidad (e) será el espesor del material, su ancho (w) será de 50mm y su longitud (L) será 48 veces su espesor más 50mm, dando una longitud de 500mm.

En la figura 21 se puede notar las dimensiones de la muestra requerida en el ensayo de acuerdo a lo expuesto en la norma ASTM D-3043.

#### Figura 21

*Probeta para determinar el módulo de elasticidad*



### Procedimiento del ensayo

Se debe aplicar una carga a una velocidad constante durante toda la prueba, de la misma forma se medirá la carga aplicada en la muestra. Para el cálculo de la velocidad de aplicación de la carga se utilizó la siguiente formula:

$$N = \frac{z * L^2}{6d} \quad (4)$$

Donde:

N=velocidad del movimiento de la cabeza móvil, (mm/min)

L= longitud entre los apoyos, mm

d=espesor de la muestra, mm

z=tasa unitaria de deformación de la fibra, 0.0015 mm/mm\*min

### Cálculos

#### Módulo de ruptura

$$Sb = \frac{3 * P * L}{2 * w * e} \quad (5)$$

Donde:

Sb=módulo de ruptura, MPa

P=máxima carga, N

L= longitud entre los apoyos, mm

w= ancho de la muestra, mm

e=espesor de la muestra, mm

#### Módulo de elasticidad

$$EI = (L^3/48) * (P/\Delta) \quad (6)$$

Donde:

E=módulo de elasticidad, MPa

P/Δ= pendiente de la carga/curva de deflexión, N/mm

I=momento de inercia de la sección transversal, mm<sup>4</sup>

L= longitud entre los apoyos, mm

### Inercia de la sección transversal

$$I = \frac{w * e^3}{12} \quad (7)$$

Donde:

I= momento de inercia de la sección transversal, mm<sup>4</sup>

w= ancho de la muestra, mm

e=espesor de la muestra, mm

### Preparación de la muestra

Para obtener resultados fiables se ha procedido a realizar 14 probetas para el ensayo a flexión a cada una de estas probetas se ha codificado con la letra F como se aprecia en la figura 22.

### Figura 22

*Muestras para el ensayo de flexión*



Por otro lado, se obtuvo las dimensiones tanto de largo, ancho y espesor de cada una de las muestras con ayuda de un calibrador electrónico Fowler, dichas dimensiones se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5***Dimensiones de muestras para el ensayo a flexión*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>
F1	500	50.66	9.76
F2	500	50.58	9.69
F3	500	50.62	9.94
F4	500	50.79	9.92
F5	500	50.31	9.66
F6	500	50.6	9.64
F7	500	50.66	9.58
F8	500	50.22	9.79
F9	500	50.27	9.77
F10	500	50.48	9.73
F11	500	50.36	9.84
F12	500	50.68	9.82
F13	500	50.73	10.05
F14	500	50.34	9.74

**Protocolo de ensayo**

El ensayo a flexión se lo llevó a cabo en la maquina universal de marca Shimadzu de 50 KN de capacidad.

En la figura 23 se puede apreciar que para el ensayo flexión se necesita de un accesorio que cumplirá la función de apoyos fijos los cuales estarán ubicados a una distancia libre de 400mm sobre el cual se apoyará la muestra, por otro lado, se utiliza un cabezal que aplicara una fuerza en el centro de la muestra a una velocidad constante de 4mm/min, con la cual se garantiza que la muestra fallara en un rango entre 3 y 10 minutos como se expone en la norma.

## Figura 23

*Maquina y accesorios utilizados en el ensayo a flexión*



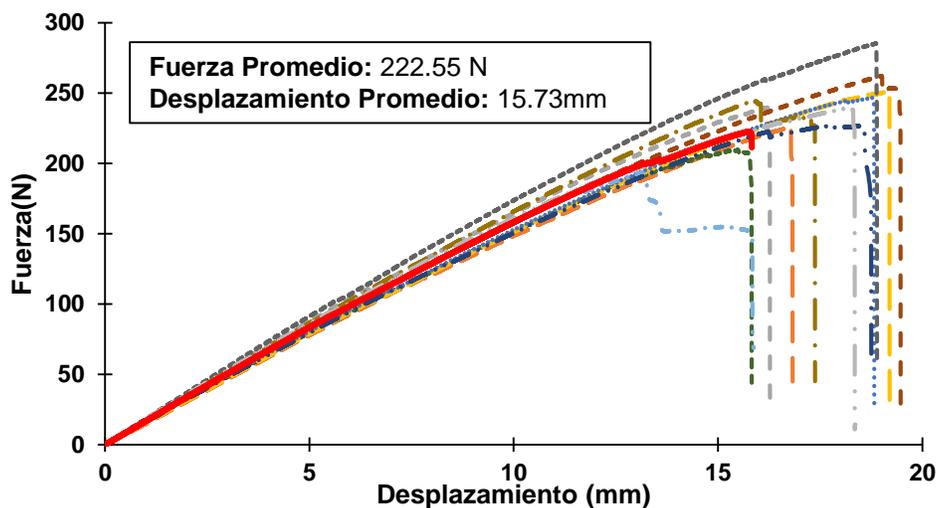
### Análisis de resultados

Una vez realizado el ensayo se presenta la gráfica donde se indica la curva Fuerza-Desplazamiento, de cada una de las muestras.

En la figura 24 están representadas mediante línea punteada cada una de las curvas de las muestras ensayadas, mientras que la línea roja y continua representa la curva promedio del ensayo a flexión.

## Figura 24

*Curva fuerza-Desplazamiento del ensayo a flexión*



De los ensayos realizados se determinaron la fuerza y el desplazamiento máximo que resistió cada una de las muestras esto se puede apreciar en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Resultados del ensayo a flexión Fuerza-Desplazamiento*

<b>Muestra</b>	<b>Fuerza Máxima N</b>	<b>Desplazamiento mm</b>
F1	187.79	14.37
F2	226.10	16.78
F3	239.79	16.21
F4	209.66	15.48
F5	251.17	19.19
F6	246.68	18.79
F7	248.55	18.16
F8	209.90	15.73
F9	193.41	13.15
F10	262.17	19.01
F11	285.39	18.86
F12	244.11	15.91
F13	226.78	18.37
F14	306.22	21.91
F15	239.64	18.19
<b>Promedio</b>	<b>238.49</b>	<b>17.34</b>
<b>Desv. Estandar</b>	31.91	2.24
<b>CoV</b>	0.13	0.13

En la tabla 6 se tiene la fuerza máxima que soportó cada una de las muestras además se puede concluir que el material del cual está constituido el panel OSB es capaz de resistir una fuerza promedio de 238.49 N.

### **Módulo de ruptura**

Para calcular el módulo de ruptura del material se procede a utilizar la fórmula 5, tomando una distancia entre los apoyos de 400mm, en la tabla 7 se presenta los valores para cada muestra, además del módulo de ruptura promedio de 289.66 Mpa.

**Tabla 7***Resultado del módulo de ruptura del panel OSB*

<b>Muestra</b>	<b>Fuerza máxima N</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>	<b>Sb MPa</b>
F1	187.79	50.66	9.76	227.89
F2	226.10	50.58	9.69	276.79
F3	239.79	50.62	9.94	285.93
F4	209.66	50.79	9.92	249.67
F5	251.17	50.31	9.66	310.08
F6	246.68	50.60	9.64	303.43
F7	248.55	50.66	9.58	307.28
F8	209.90	50.22	9.79	256.15
F9	193.41	50.27	9.77	236.28
F10	262.17	50.48	9.73	320.25
F11	285.39	50.36	9.84	345.55
F12	244.11	50.68	9.82	294.30
F13	226.78	50.73	10.05	266.88
F14	306.22	50.34	9.74	374.73
<b>Promedio</b>	238.41	50.52	9.78	<b>289.66</b>
<b>Desv. Estandar</b>	33.11	0.19	0.13	41.44
<b>CoV</b>	0.14	0.00	0.01	0.14

**Módulo de elasticidad**

De la misma forma, para calcular el módulo de elasticidad a flexión ( $MOE_F$ ) del panel OSB se utiliza la fórmula 5, en la figura 25 se indica la curva Fuerza-Desplazamiento de la muestra 5 en línea entrecortada de color azul, mientras que en línea de color rojo se indica la línea de tendencia en la zona lineal de la curva con su respectiva ecuación y pendiente de la recta (N/mm), cabe recalcar que la distancia libre entre los apoyos (L) es de 400mm. Por otro lado, se utiliza la fórmula 6 para determinar la inercia de la sección transversal de la muestra.

A su vez la tabla 8 indica los resultados del módulo de elasticidad para cada una de las muestras, además se presenta el módulo de elasticidad promedio que es de 5329.91 Mpa, equivalente a 54349.95 kg/cm<sup>2</sup>.

Figura 25

Curva fuerza-Desplazamiento y línea de tendencia

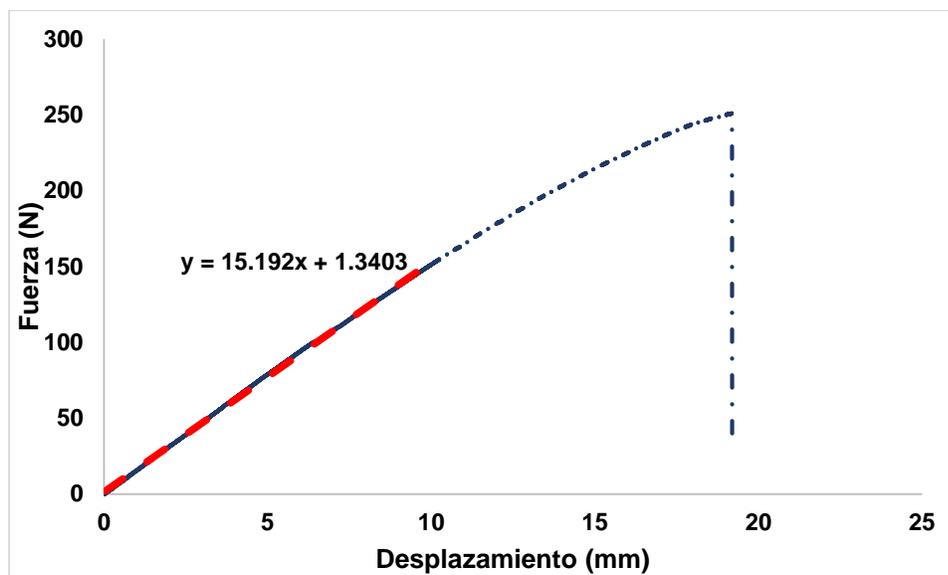


Tabla 8

Resultados del módulo de elasticidad para cada una de las muestras

Muestra	P/Δ (N/mm)	Inercia I (mm <sup>4</sup> )	MOE <sub>F</sub> (MPa)
F1	14.41	3924.94	4894.51
F2	14.98	3835.03	5208.48
F3	16.47	4142.86	5300.69
F4	15.14	4131.73	4884.80
F5	15.19	3779.24	5359.81
F6	15.28	3777.46	5392.68
F7	15.52	3711.76	5576.50
F8	15.27	3926.84	5183.81
F9	16.37	3906.71	5586.28
F10	15.75	3875.04	5420.67
F11	17.36	3998.43	5789.27
F12	16.66	3999.35	5555.23
F13	15.11	4291.23	4695.78
F14	16.78	3876.22	5770.22
<b>Promedio</b>	15.74	3941.21	<b>5329.91</b>
<b>Desv. Estandar</b>	0.85	160.13	330.74
<b>CoV</b>	0.05	0.04	0.06

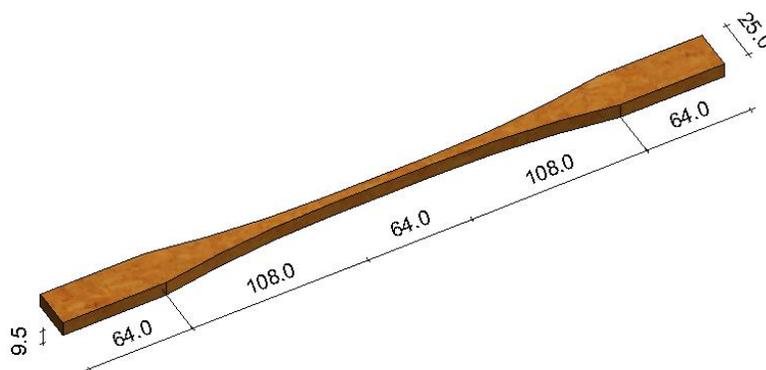
### **Ensayo a tracción**

Para la determinación de las propiedades a tracción de los paneles a base de madera se utilizó la norma ASTM D-3500, para este ensayo se utilizó el método A expuesto en la norma destinado a muestras pequeñas (ASTM D3500, 2003).

Para el ensayo se realizaron 14 probetas de un espesor  $e=9.5\text{mm}$ , con las dimensiones que se presentan en la figura 26.

### **Figura 26**

*Probeta para el ensayo a tracción*



### **Preparación de la muestra**

Para determinar la fuerza a tracción de los paneles se prepararon 14 probetas y se las codificaron con la letra T, como se aprecia en la figura 27.

### **Figura 27**

*Muestras utilizadas en el ensayo a tracción*



### Protocolo del ensayo

Para la determinación de las propiedades mecánicas a tracción se utilizó la máquina universal de marca Shimadzu con una capacidad de 50KN con la cual mediante mordazas tipo cuña se sostiene la muestra tanto en su parte superior como en su parte inferior en la figura 28 se puede apreciar la muestra a ser ensayada ubicada en la máquina.

### Figura 28

Máquina y accesorios utilizados en el ensayo a tracción



Con la ayuda de un calibrador electrónico Fowler se toma las dimensiones de cada una de las muestras.

Se ubica la muestra en las mordazas, una vez centrada la muestra se procede a asegurar la muestra cerrando las mordazas hasta que estén fijas y no presenten holgura.

Cabe recalcar que la mordaza ubicada en la parte inferior es fija mientras que la mordaza superior es la que se encargara de aplicar una fuerza de tracción a una velocidad

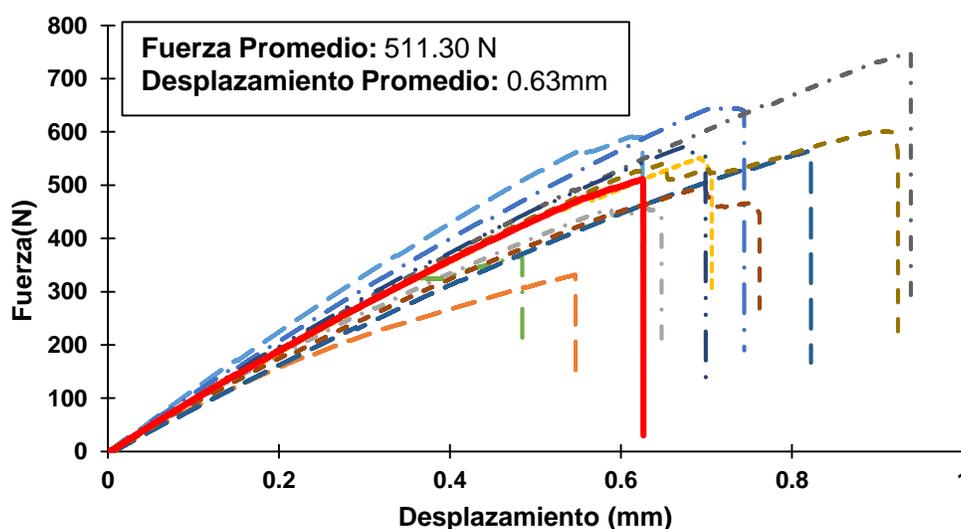
constante de 0.2mm/min para así lograr que la muestra falle en un rango de 3 a 10 min como se expone en la norma.

### Análisis de los resultados

En la figura 29 se presenta la curva de Fuerza-Desplazamiento para cada una de las muestras ensayadas, se puede apreciar que el rango de desplazamientos esta entre 0.5 mm y 0.95mm de la misma forma se tiene un rango de fuerza máxima a tracción entre 33 y 77 kg.

### Figura 29

*Curva Fuerza Desplazamiento del ensayo a Tracción*



En la figura 29 se puede notar el comportamiento de cada una de las muestras al ser sometidas a una fuerza a tracción mediante una línea punteada, mientras que se ha definido una curva promedio con una línea continua de color rojo en la cual se ha determinado una fuerza promedio.

La fuerza máxima que resiste cada una de las muestras una vez ensayadas se presenta en la tabla 9, además se tiene una fuerza a la tracción promedio de 50.78 kg

**Tabla 9***Fuerza máxima a tracción*

<b>Muestra</b>	<b>Fuerza kg</b>
T1	60.29
T2	33.86
T3	46.50
T4	42.64
T5	56.19
T6	65.74
T7	37.36
T8	57.64
T9	12.91
T10	50.69
T11	70.74
T12	58.80
T13	58.73
<b>Promedio</b>	50.16
<b>Desv. Estandar</b>	15.54
<b>CoV</b>	0.31

***Ensayo a compresión***

Este ensayo permite determinar las propiedades a la compresión de paneles a base de madera mediante la utilización de la norma ASTM D-3501, para la presente investigación se utilizó el método A expuesto en la norma que está dirigido para el ensayo de probetas pequeñas para determinar las propiedades a la resistencia elástica como a la compresión, así como determinar la resistencia máxima a la compresión (ASTM D3501, 2016).

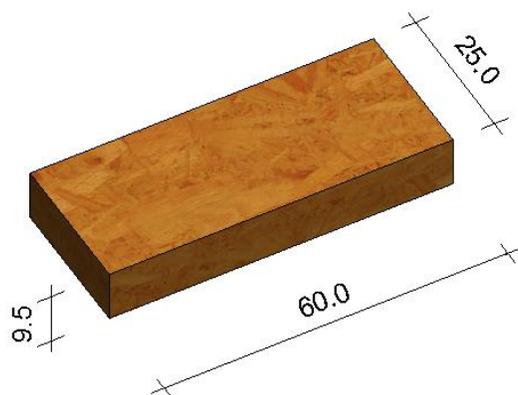
Mediante la máquina UTM SHIMADZU se aplica una carga con movimiento continuo en el cabezal para causar la falla dentro de los 3 y 10 minutos después de iniciado el ensayo. (ASTM D3501, 2016)

Para realizar los ensayos y determinar la resistencia elástica a la compresión se realizó 16 probetas de 60x25x9mm, cuyas caras son perfectamente lisas y paralelas entre sí y en ángulos rectos.

En la figura 30 se presenta la isometría de la probeta con sus dimensiones de la muestra que será utilizada en el ensayo a compresión.

### Figura 30

*Probeta para el ensayo a compresión*



### Preparación de la muestra

Una vez determinadas las dimensiones de la muestra de acuerdo a la norma ASTM D3501, se procede a elaborar un total de 16 muestras para realizar el ensayo a compresión, además para identificarlas se ha codificado con la letra C como se indica en la figura 31.

### Figura 31

*Muestras para el ensayo a compresión*



De la misma manera con ayuda de un calibrador electrónico Fowler se tomó las dimensiones de cada una de las muestras lo cual se puede apreciar en la tabla 10

**Tabla 10**

*Dimensiones de las muestras a compresión*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>
C1	60.54	25.61	9.71
C2	60.18	25.59	9.73
C3	60.12	25.57	9.66
C4	60.48	25.34	9.36
C5	60.56	25.62	9.72
C6	58.76	25.34	9.55
C7	60.31	26.05	9.71
C8	60.11	25.32	9.46
C9	59.95	25.6	9.87
C10	59.92	25.58	9.79
C11	59.56	25.36	9.58
C12	60.8	26.09	9.69
C13	59.01	25.68	9.57
C14	59.21	25.97	9.67
C15	60.25	25.45	9.45
C16	60.05	25.31	9.74
<b>Promedio</b>	59.98	25.59	<b>9.64</b>

### **Protocolo de ensayo**

Para realizar el ensayo a compresión se utilizó la maquina universal Shimadzu con una capacidad de 50 KN, y dos accesorios circulares con una cara plana como se aprecia en la figura 32.

**Figura 32**

*Maquina y accesorio para el ensayo de compresión*

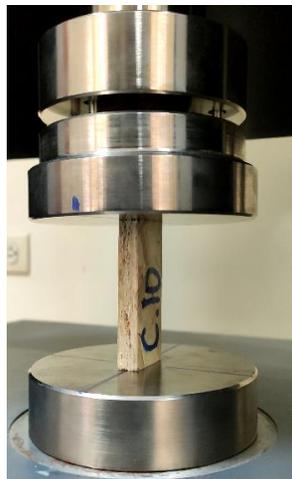


En primer lugar, se debe tomar las medidas de cada una de las muestras tanto el largo, ancho como el espesor.

Para tener una mejor precisión se debe realizar marcas en las muestras indicando el centro tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal, de la misma manera se deben marcar los accesorios utilizados, estas marcas permitirán que la fuerza sea aplicada de la forma correcta (ver figura 33).

**Figura 33**

*Marcas para centrar la muestra*



Una vez centrada la muestra se procede a bajar el accesorio superior hasta que la muestra no pueda desplazarse en ninguna dirección.

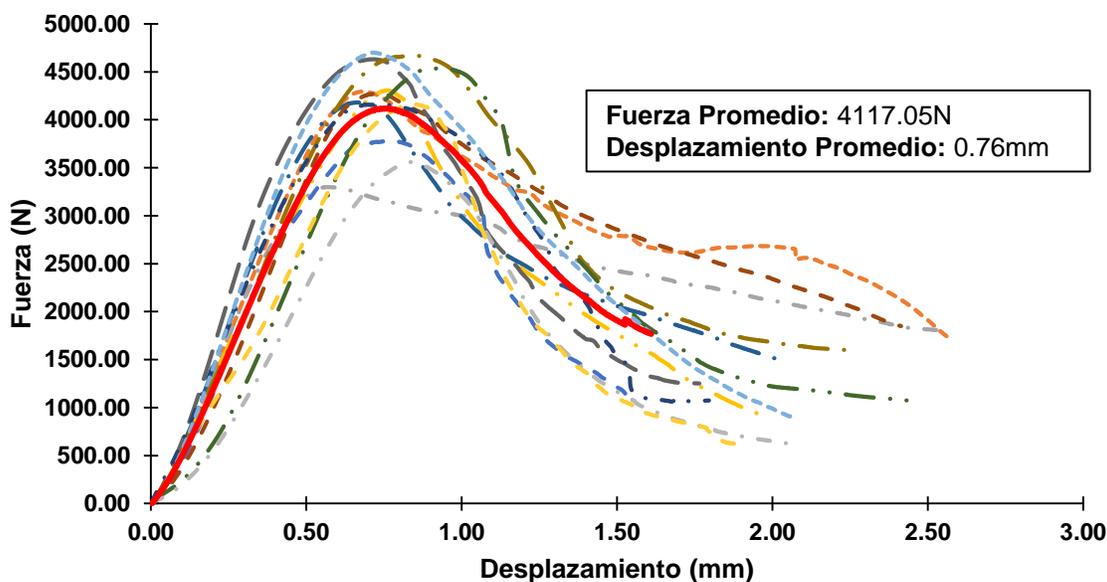
Para continuar se procede a configurar la máquina para que aplique una fuerza de compresión desde el accesorio superior a una velocidad constante de 0.2mm/min asegurando que la muestra falle en un rango entre 3 y 10 min como expone la norma.

### Análisis de resultados

Una vez realizado el ensayo en cada una de las muestras se procede a realizar las curvas Fuerza-Desplazamiento de cada muestra cómo se puede apreciar en la figura 34.

**Figura 34**

*Curva Fuerza Desplazamiento del ensayo de compresión*



En la figura 34 se puede notar las curvas Fuerza-Desplazamiento de cada muestra en líneas punteadas, mientras que la línea continua de color roja representa la curva promedio de todas las muestras.

Por otro lado, se determinó la fuerza máxima que resiste cada una de las muestras y se determinó que la fuerza promedio que es capaz de resistir el material es de 3995.94 N como se puede apreciar en la tabla 11.

**Tabla 11***Fuerza máxima a compresión*

<b>Muestra</b>	<b>Fuerza N</b>
C1	2663.82
C2	4293.36
C3	3297.85
C4	4307.41
C5	3785.07
C6	3216.92
C7	4179.98
C8	4277.93
C9	4631.11
C10	4668.41
C11	4158.03
C12	4535.33
C13	4700.11
C14	3494.88
C15	3559.78
C16	4165.06
<b>Promedio</b>	<b>3995.94</b>
<b>Desv. Estandar</b>	597.25
<b>CoV</b>	0.15

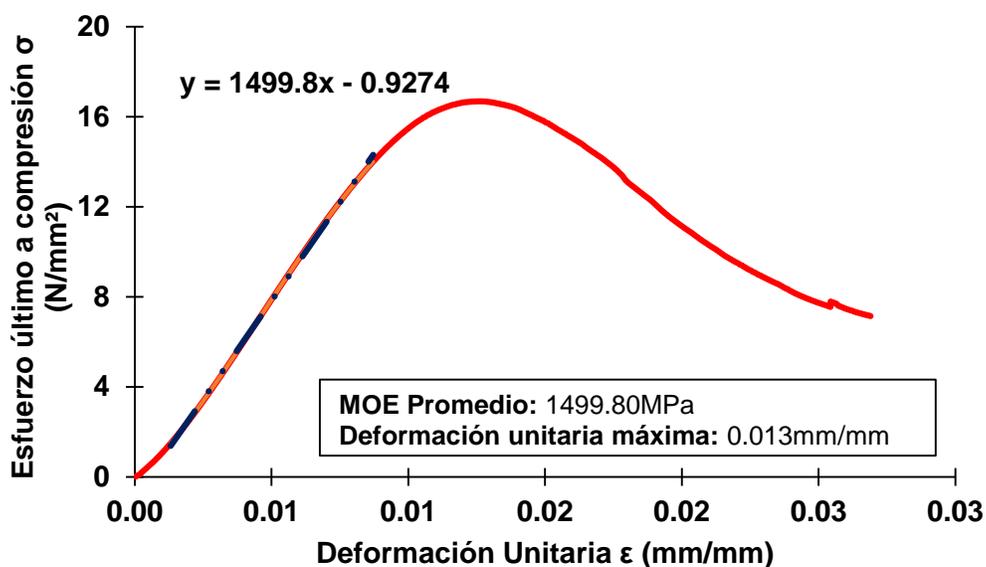
**Módulo de elasticidad**

Una vez determinado la curva de fuerza desplazamiento promedio se puede también elaborar la curva Esfuerzo-Deformación, en la figura 34 se puede notar las curvas de cada una de las muestras.

Por otro lado, para conocer cuál es el módulo de elasticidad del material es necesario determinar la pendiente de la curva tomando en cuenta solo el rango lineal del material, en la figura 35 podemos notar la curva Esfuerzo–Deformación promedio con su respectiva línea de tendencia, además indica la ecuación de la recta.

**Figura 35**

*Curva Esfuerzo-Deformación promedio*



De la figura 35 se puede notar que la pendiente de la línea de tendencia de la curva Esfuerzo-Deformación promedio tiene un valor de 1499.8 MPa, o lo que equivale a 15293.70 kg/cm<sup>2</sup>

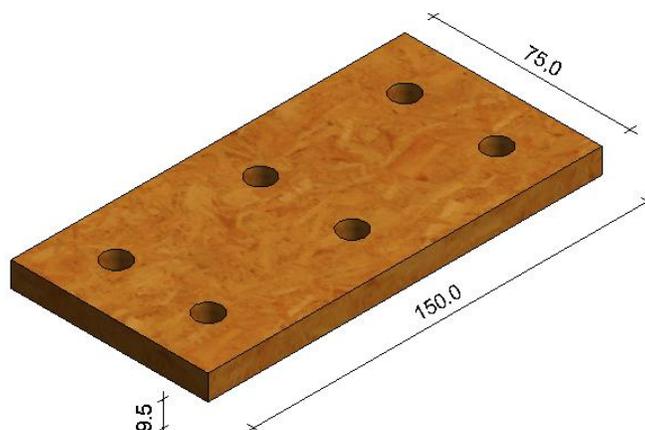
### ***Ensayo de corte***

Para la determinación de las propiedades a corte de los paneles a base de madera se utilizó la norma ASTM D-2719, para este ensayo se utilizó el método C expuesto en la norma en el cual se especifica que se deben utilizar muestras rectangulares y uniformes (ASTM D3500, 2003).

Para el ensayo se realizaron 15 probetas de un espesor  $e=9.5\text{mm}$ , de donde se determinan las siguientes dimensiones de la muestra  $150 \times 75 \times 9.5\text{mm}$ , como se puede apreciar en la figura 36.

**Figura 36**

*Probeta para ensayo a corte*



### **Preparación de la muestra**

Para realizar el ensayo a corte una vez determinado las dimensiones especificadas en la norma ASTM D-2719, se procedió a realizar 15 probetas para obtener resultados confiables, a continuación, en la tabla 12 se presentan las dimensiones.

**Tabla 12**

*Dimensiones de las muestras para el ensayo a corte*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>W mm</b>	<b>e mm</b>
S1	150.81	75.5	9.73
S2	150.74	75.88	9.69
S3	150.21	75.49	9.46
S4	150.68	75.5	9.65
S5	150.57	76.12	9.48
S6	150.6	75.65	9.59
S7	150.55	75.5	9.7
S8	150.49	75.53	9.51
S9	150.78	75.5	9.76
S10	150.72	75.45	9.61
S11	150.55	75.48	9.6
S12	150.54	75.51	9.57
S13	150.63	75.32	9.64
S14	150.76	75.87	9.66
S15	150.35	75.48	9.51

Por otro lado, se identifica a las muestras con el código S y el respectivo número de la muestra cómo se indica en la figura 37, cabe recalcar que se realiza 6 agujeros de 10 mm de diámetro que son necesarios para realizar el ensayo.

### Figura 37

*Codificación de muestra para el ensayo a corte*



### Protocolo de ensayo

Para la realización del ensayo se utilizó la maquina universal Shimadzu con una capacidad de 50 KN, y dos accesorios tipo mordazas con tres agujeros en cada una de estas como se aprecia en la figura 38.

### Figura 38

*Accesorios para el ensayo a corte*



Para proceder con el ensayo a corte se coloca las muestras en las mordazas sujetándolas de cada extremo.

Se asegura las muestras mediante el ajuste de pernos y tuercas en cada una de las mordazas.

Se procede a ubicar la muestra en la máquina, con la ayuda de unos pasadores se asegura una de las mordazas a la parte superior de la máquina que a su vez se encargará de aplicar una fuerza a tracción mientras que la otra mordaza se asegura en la parte inferior y está por lo contrario se mantendrá fija.

Para contar con resultados confiables es preciso que la muestra quede bien centrada de tal forma que no existe desplazamientos laterales.

En la figura 39 se puede apreciar cómo se debe colocar la muestra en la maquina Shimadzu para proceder a ser ensayadas.

### **Figura 39**

*Ubicación de la muestra en la máquina para el ensayo a corte*



Para continuar con el ensayo se procede a configurar la máquina para que aplique una fuerza desde el accesorio superior a una velocidad constante de 1 mm/min para que la muestra falle en un rango ente 3 y 10 min como expone la norma.

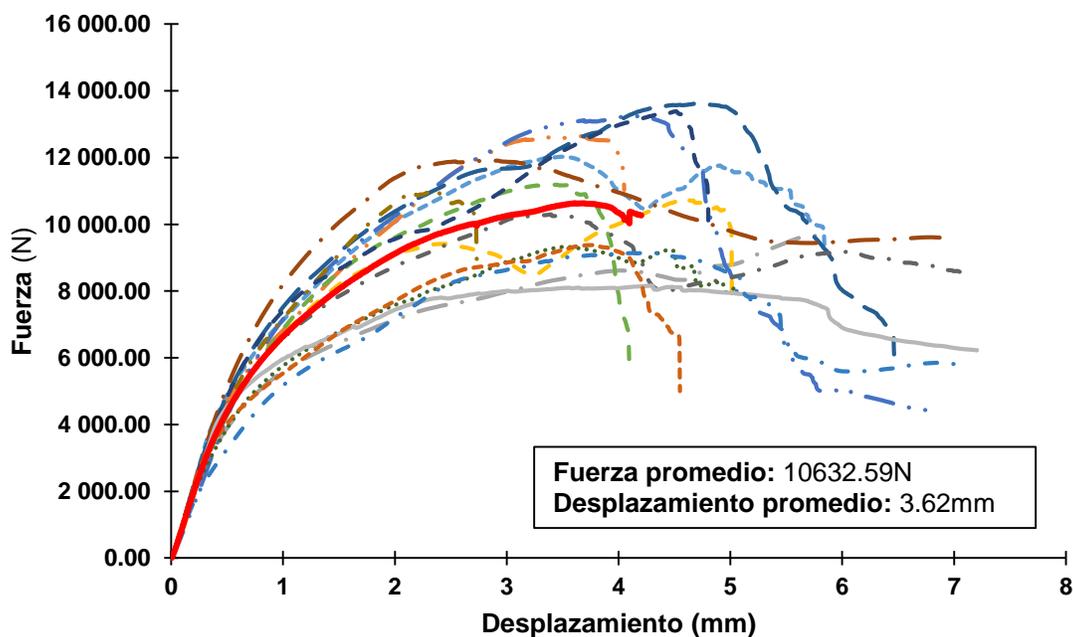
Una vez iniciado el ensayo la parte superior de la maquina aplicara una fuerza constante mientras que la parte inferior se mantendrá fija, este proceso debe continuar hasta que la muestra falle en dirección paralela a su sección longitudinal.

### Análisis de los resultados

Una vez realizados los ensayos en cada una de las muestras se procede a elaborar la curva Fuerza-Desplazamiento en la figura 40 se presenta estas curvas para cada una de las muestras ensayadas en línea punteada mientras que en línea continua de color rojo la curva promedio.

**Figura 40**

*Curva Fuerza-Desplazamiento del ensayo a corte*



Para calcular el máximo esfuerzo cortante se procede con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{P}{L * e} \quad (8)$$

Donde:

T: Máximo esfuerzo cortante (N/m<sup>2</sup>)

P: Máxima carga (N)

L: Longitud del área a corte (m)

e: Espesor del área a corte (m)

En la tabla 13 se puede apreciar el esfuerzo cortante para cada una de las muestras ensayadas además del esfuerzo cortante promedio para el material de estudio se tiene un valor de 7.64 N/mm<sup>2</sup>.

**Tabla 13**

*Máximo esfuerzo cortante*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>e mm</b>	<b>F N</b>	<b>T N/mm<sup>2</sup></b>
S1	150.81	9.73	9326.34	6.36
S2	150.74	9.69	8167.75	5.59
S3	150.21	9.46	9151.94	6.44
S4	150.68	9.65	9377.03	6.45
S5	150.57	9.48	12024.77	8.42
S6	150.60	9.59	12639.20	8.75
S7	150.55	9.70	9712.17	6.65
S8	150.49	9.51	10795.75	7.54
S9	150.78	9.76	13245.65	9.00
S10	150.72	9.61	11187.36	7.72
S11	150.55	9.60	11908.21	8.24
S12	150.54	9.57	13630.90	9.46
S13	150.63	9.64	10296.30	7.09
S14	150.76	9.66	11039.31	7.58
S15	150.35	9.51	13387.47	9.36
<b>Promedio</b>	150.60	9.61	11059.34	<b>7.64</b>
<b>Desv. Estandar</b>	0.16	0.09	1717.10	1.21
<b>CoV</b>	0.00	0.01	0.16	0.16

### Modulo efectivo de rigidez

De la misma manera para obtener el módulo de rigidez a corte debemos calcularlo con la siguiente ecuación

$$G = 0.5 * \frac{P}{\Delta} * \frac{l}{L * t} \quad (9)$$

Donde:

G=módulo de rigidez para toda la muestra, N/mm<sup>2</sup>

P/Δ= pendiente de la curva fuerza-deformación por debajo de la carga limite proporcional, N/mm.

L= Longitud de la muestra

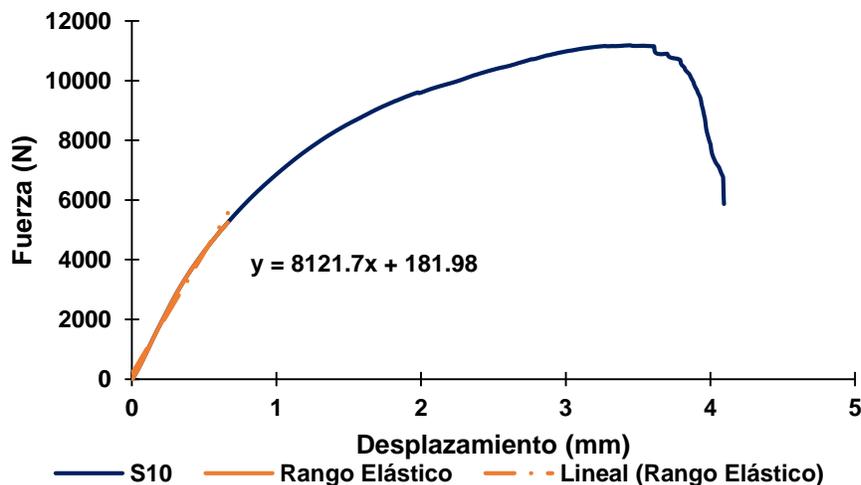
t=espesor de la muestra, mm

l= Longitud calibrada de la muestra

Se procede a determinar la pendiente de la curva de Fuerza desplazamiento para cada una de las muestras en la figura 41 se presenta la curva de la muestra 10 con su respectiva línea de tendencia (que representa el rango lineal de la muestra ensayada y se muestran resaltado en color naranja y su pendiente.

### Figura 41

Curva fuerza-Desplazamiento y línea de tendencia de la muestra 10



Para continuar con el cálculo se presenta las pendientes y dimensiones de cada una de las muestras ensayadas con lo que se puede determinar el módulo de rigidez a corte, estos valores se pueden apreciar en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Cálculo del módulo de rigidez a corte*

<b>Muestra</b>	<b>L mm</b>	<b>w mm</b>	<b>e mm</b>	<b>P/Δ N/mm</b>	<b>G N/mm<sup>2</sup></b>
S1	150.81	100.5	9.73	6888.20	235.88
S2	150.74	100.58	9.69	8320.70	286.48
S3	150.21	100.47	9.46	5631.90	199.10
S4	150.68	100.85	9.65	9379.70	325.28
S5	150.57	99.98	9.48	9835.10	344.44
S6	150.60	100.61	9.59	9386.40	326.94
S7	150.55	100.23	9.70	7479.50	256.68
S8	150.49	100.84	9.51	7914.90	278.84
S9	150.78	99.89	9.76	8294.30	281.50
S10	150.72	100.87	9.61	8121.70	282.80
S11	150.55	100.52	9.60	8737.50	303.85
S12	150.54	100.98	9.57	8719.00	305.57
S13	150.63	100.89	9.64	7549.20	262.26
S14	150.76	100.55	9.66	9154.80	316.04
S15	150.35	100.21	9.51	8394.80	294.18
<b>Promedio</b>	150.60	100.53	9.61	8253.85	<b>286.66</b>
<b>Desv. Estándar</b>	0.16	0.33	0.09	1079.24	37.67
<b>CoV</b>	0.00	0.00	0.01	0.13	0.13

De la tabla 14 se puede determinar que los paneles OSB presentan un valor promedio de módulo de rigidez a corte de 286.66 N/mm<sup>2</sup>.

## Capítulo IV

### Modelamiento y análisis computacional

La modelación computacional se lo realizó mediante el uso de un software comercial reconocido a nivel latinoamericano, que permite ejecutar análisis estático, dinámico entre otros y también se puede modelar y analizar distintos materiales a través de un análisis de elementos finitos, este software será utilizado para la modelación tanto de los tableros OSB como de la vivienda a base de fardos de paja y mochetas de madera.

#### Modelamiento de tableros OSB

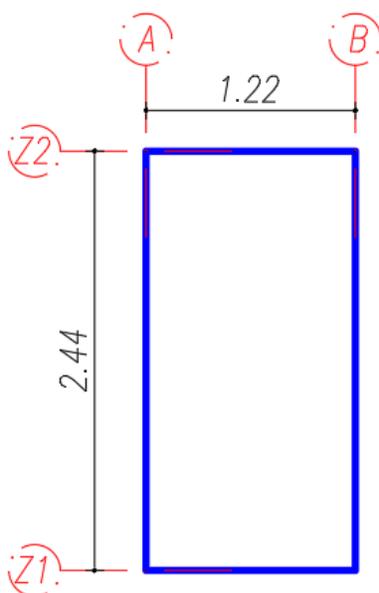
##### *Condiciones de borde y propiedades geométricas*

El inicio consiste del análisis computacional consiste en modelar el tablero OSB mediante el uso de una sección tipo Shell para ello se presenta paso a paso la modelación

Para simular un tablero completo se genera los ejes del panel que para el caso de análisis se tiene un panel OSB de las siguientes características ancho de 122 cm, una altura de 244 cm y un espesor de 0.95 cm.

#### Figura 42

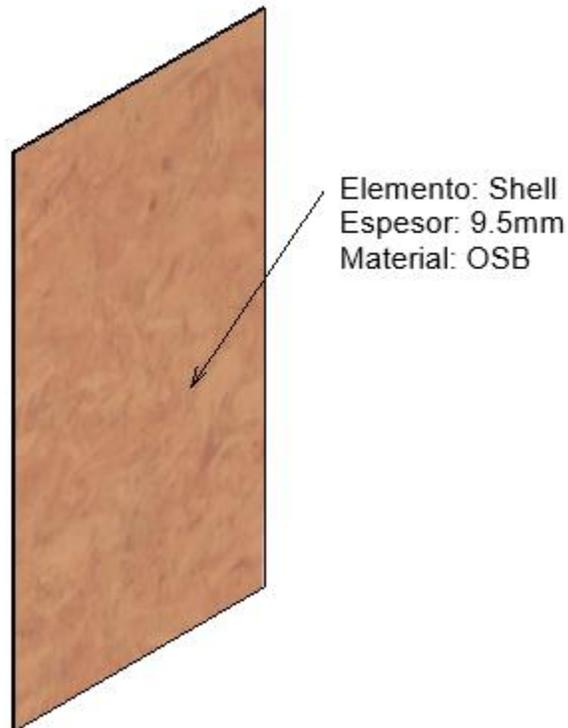
*Definición de las dimensiones del panel*



Para la modelación se crea una sección tipo Shell la cual asemejara un panel OSB de espesor 9.5mm, se introduce el espesor del panel tanto en membrana como en bending, a su vez que se elige el tipo de material.

### Figura 43

*Definición de las características de la sección del tablero*

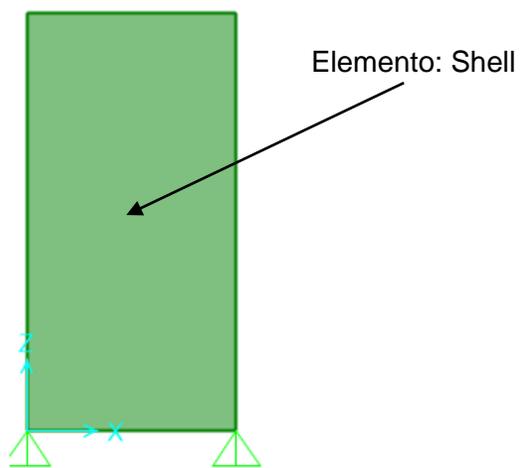


Una vez definido tanto los materiales como las propiedades se asigna la sección tipo Shell con las dimensiones creadas previamente

Las condiciones de borde se asumen como apoyos fijos para impedir el desplazamiento en cualquier dirección del tablero.

**Figura 44**

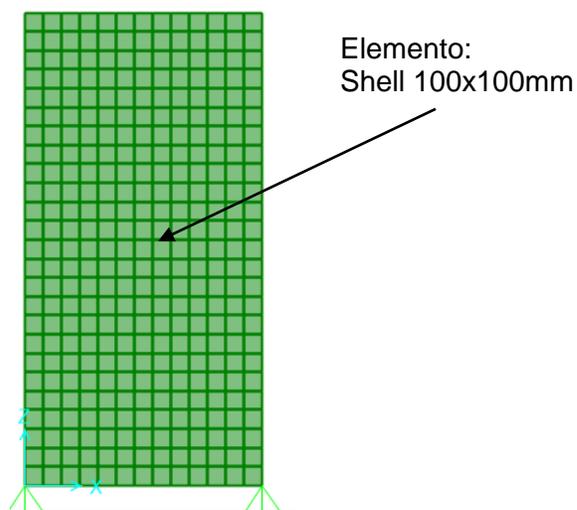
*Asignación de la sección tipo Shell*



Para el análisis por elementos finitos se realiza un modelo con elementos cuadrados dividiendo al panel completo en elementos más pequeños de dimensiones de 100mmx100mm.

**Figura 45**

*División del tablero en elementos cuadrados más pequeños*



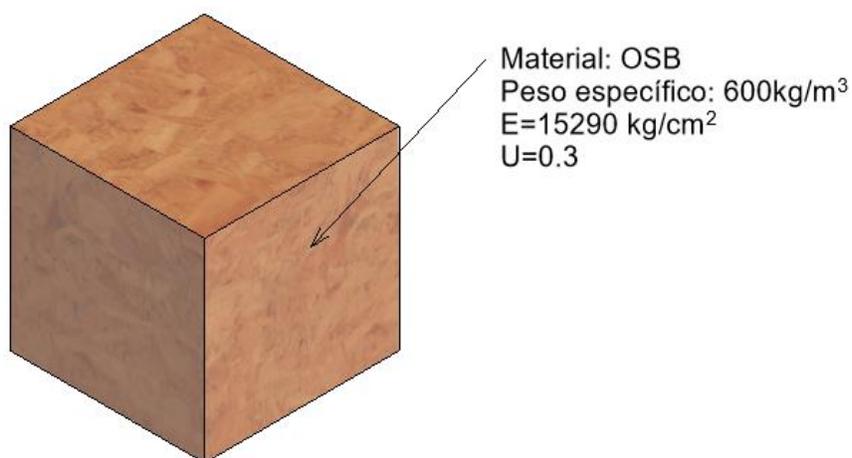
Con los elementos finitos realizados en la parte superior del tablero se generaron 14 puntos sobre los cuales posteriormente se pudo asignar cargas puntuales de la misma magnitud que asemejan a la aplicación de una sola carga total sobre el tablero.

### ***Propiedades mecánicas***

Con los valores obtenidos de los ensayos de laboratorio se procede a definir los materiales con las propiedades mecánicas de un panel OSB, en este primer modelo se ingresa un valor de módulo de elasticidad de  $15290 \text{ kg/cm}^2$ , determinado mediante el ensayo a compresión, un peso específico de  $600 \text{ kg/m}^3$ , determinado a través del ensayo de densidad específica y un módulo de poisson de 0.3, como se puede apreciar en la figura 46.

### **Figura 46**

*Definición de las propiedades del material*



### ***Condiciones de carga***

Para asignar diferentes cargas sobre la parte superior de panel y poder asegurarnos que el muro recibiese ya sea una carga muerta o viva en dirección vertical, se crea diferentes tipos de patrones de carga donde cada uno permite aplicar una carga diferente y con ello analizar el comportamiento del panel al ser sometido a diferentes cargas. Se crearon 6 patrones de carga, los cuales permitirán asignar una carga viva distribuida entre  $50 \text{ kg/m}$  y  $300 \text{ kg/m}$  (ver tabla 15).

**Tabla 15***Definición de patrones de carga*

<b>Patron de carga</b>	<b>Tipo</b>	<b>Peso propio</b>
PP	Dead	1
L50	Live	0
L100	Live	0
L150	Live	0
L200	Live	0
L250	Live	0
L300	Live	0

Para realizar un análisis de pandeo en los paneles es necesario configurar los casos de carga donde se precisa cambiar de un caso lineal estático (linear static), por un caso de pandeo (Buckling), en cada uno de los patrones de carga creados anteriormente esto se puede apreciar de mejor manera en la siguiente tabla 16.

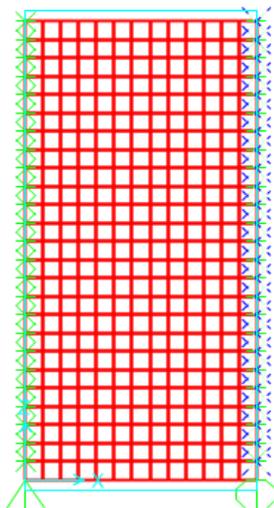
**Tabla 16***Configuración de caso de carga para pandeo*

<b>Patron de carga</b>	<b>Nombre</b>	<b>Factor de escala</b>	<b>Caso de carga</b>
Patron de carga	L50	1	Buckling
Patron de carga	L100	1	Buckling
Patron de carga	L150	1	Buckling
Patron de carga	L200	1	Buckling
Patron de carga	L250	1	Buckling
Patron de carga	L300	1	Buckling

Además de elegir el tipo de análisis de pandeo (buckling), y a razón de que se precisa realizar el análisis de un tablero independiente es necesario restringir el movimiento en la dirección paralela al espesor que para el caso de análisis se encuentra en el sentido Y, por lo que es necesario restringir el movimiento en la componente U2 tal como se puede apreciar en la figura 47.

**Figura 47**

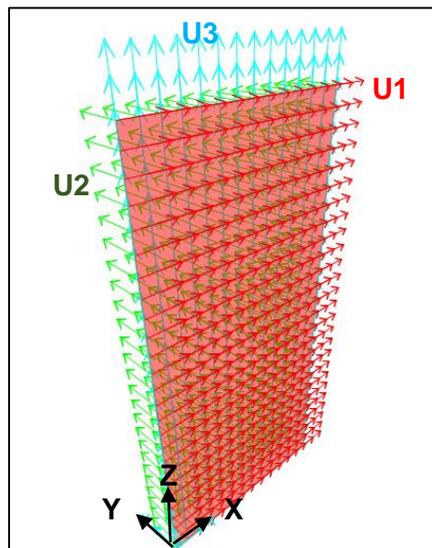
Asignación de movimiento en la dirección U2



Por otro lado, en la figura 48 se presenta los ejes locales de los puntos y paneles para indicar la dirección donde se restringe el desplazamiento para realizar el análisis de pandeo.

**Figura 48**

*Ejes locales de puntos y paneles*

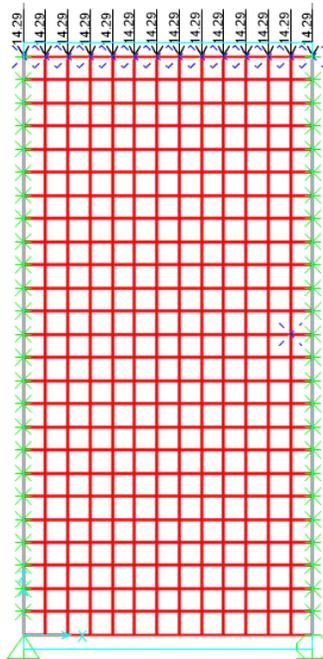


### **Cargas estáticas**

Posteriormente se asigna la carga distribuida se divide para el número de puntos existentes en la parte superior del panel y así poder simular como si se aplicara una carga distribuida sobre el mismo, una vez realizada esta operación se asigna cargas puntuales en cada uno de los puntos (joint) que se generaron al dividir el tablero en elementos cuadrados de una dimensión de 100mx100mm y para finalizar se procede a realizar el análisis.

#### **Figura 49**

*Asignación de carga vertical al tablero*

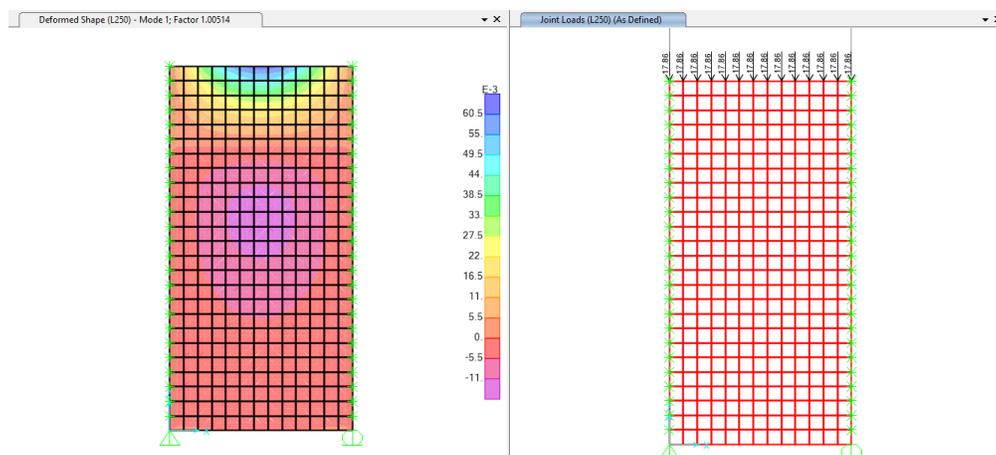


#### **Determinación de la carga crítica de Euler**

Para determinar la carga crítica de Euler se procede a tomar los valores ingresados del programa como los resultados, así por ejemplo para el modelo del panel OSB, simplemente apoyado se ingresa una carga distribuida de 250 kg/m como se indica en la figura 50.

## Figura 50

### Deformación del pandeo debido a una carga distribuida



Una vez realizado el análisis de modelo, se procede a determinar la carga crítica de pandeo mediante la teoría de Euler, con ayuda de los resultados proporcionados. Mediante el cálculo expuesto a continuación se puede determinar la carga crítica de pandeo en el modelo estudiado (Abbey, 2015)

$$Q_{cr} = q * n * F \quad (10)$$

Donde:

q: Carga puntual aplicada sobre un punto del panel

n: número de puntos sobre los cuales se aplica la carga

F: factor dado por el programa para obtener la carga crítica de pandeo

Para el modelo analizado se han dividido en elementos cuadrados de 100mmx100mm, dando como resultado un total de 14 puntos en la dirección menor del panel que tiene una dimensión de 1220mm, además se ha asignado una carga de 17.86 kg en cada uno de estos puntos.

Una vez realizado el análisis, se generan los resultados correspondientes a la deformación del panel en el cual indica la deformación máxima y provee de un factor para

determinar la carga crítica de Euler, en las condiciones antes expuestas se obtiene un factor de 1.00514.

A continuación, se presenta el cálculo de la carga crítica de Euler utilizando tanto el factor generado por el programa como las condiciones del análisis.

$$Q_{cr} = 17.86 * 14 * 1.00514$$

$$Q_{cr} = 251.33 \text{ kg/m}$$

### ***Método de progresión de esfuerzos***

#### ***Estudio de convergencia***

El software utilizado tiene la capacidad de realizar análisis de elementos finitos, obteniendo respuestas más confiables y aproximadas a la realidad, esto se logra al realizar varios modelos con los cuales se determina que no exista variación del resultado en el desplazamiento.

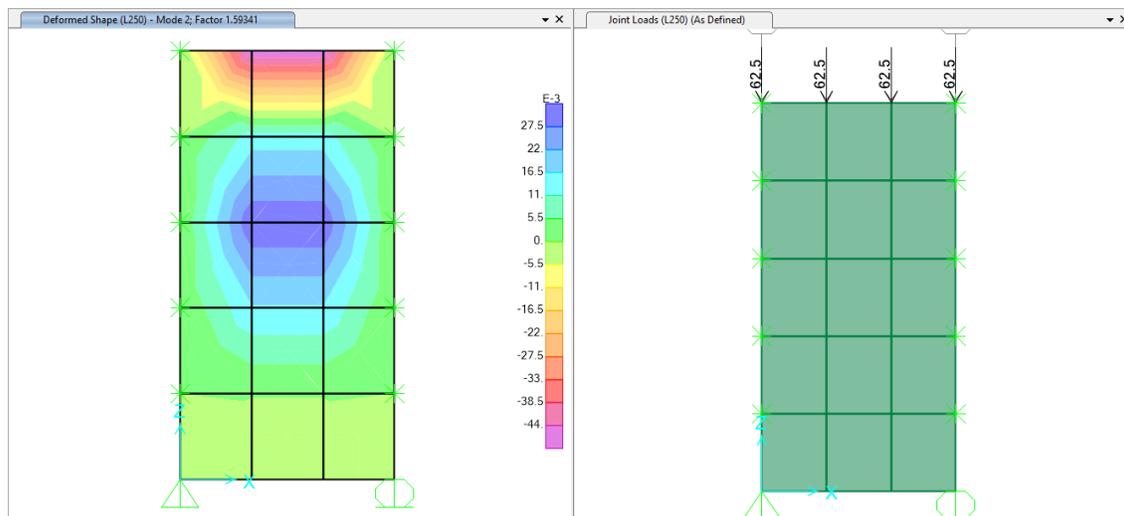
Por ejemplo, para el tablero OSB analizado se inicia con una división en elementos cuadrados de 500mmx500mm, donde se obtienen desplazamientos entre -44 y 27.5mm, al realizar divisiones de 300mmx300mm se tiene desplazamientos entre 18 y 60 milímetros. Como se tiene una variación en los resultados se continúa realizando divisiones, para lo que se crea elementos de 200mmx200mm, con lo que se obtiene un rango de desplazamientos entre -11.00 y 60.5 milímetros,

Una vez más se crea elementos de 150mmx150mm y 100mmx100mm con los cuales se obtienen desplazamientos entre -11.00 y 60.5 milímetros, con lo cual se puede concluir que se obtiene resultados confiables al trabajar con elementos cuadrados de 100x100mm.

De la figura 51 a la 57 se presenta los resultados de desplazamiento al ser analizados bajo diferente número de elementos finitos.

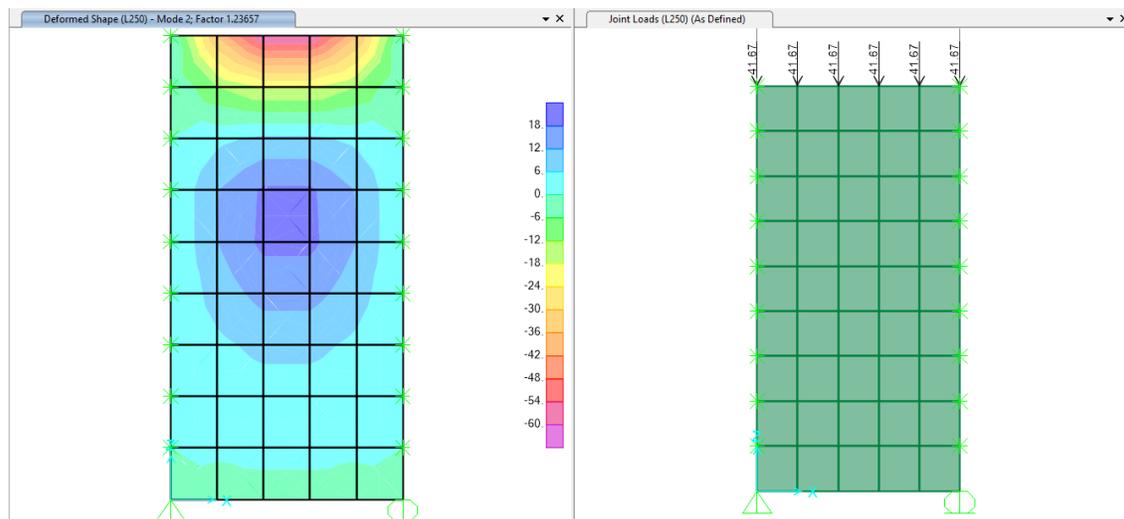
**Figura 51**

*Elementos cuadrados de 500x500mm*



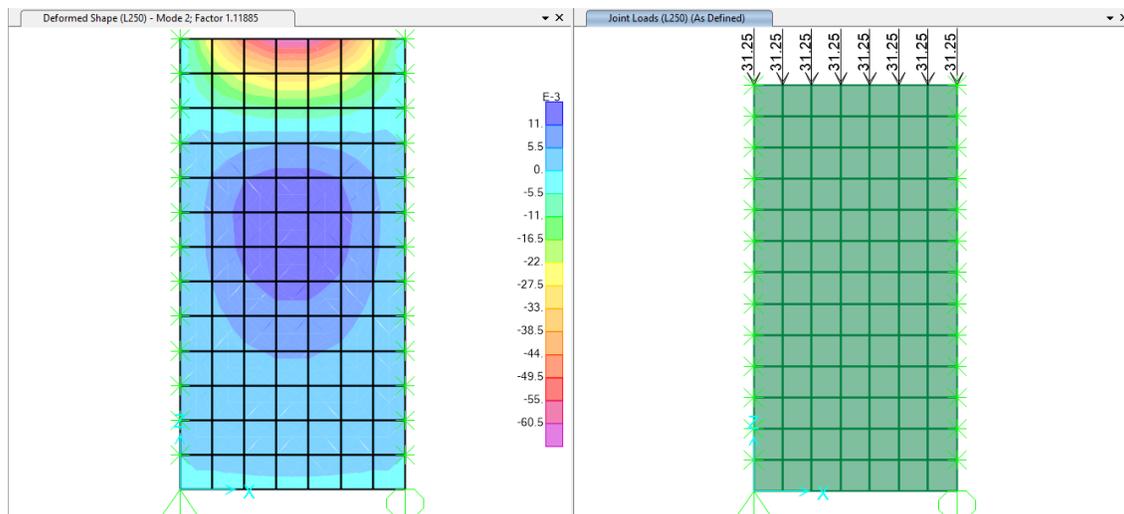
**Figura 52**

*Elementos cuadrados de 300x300mm*



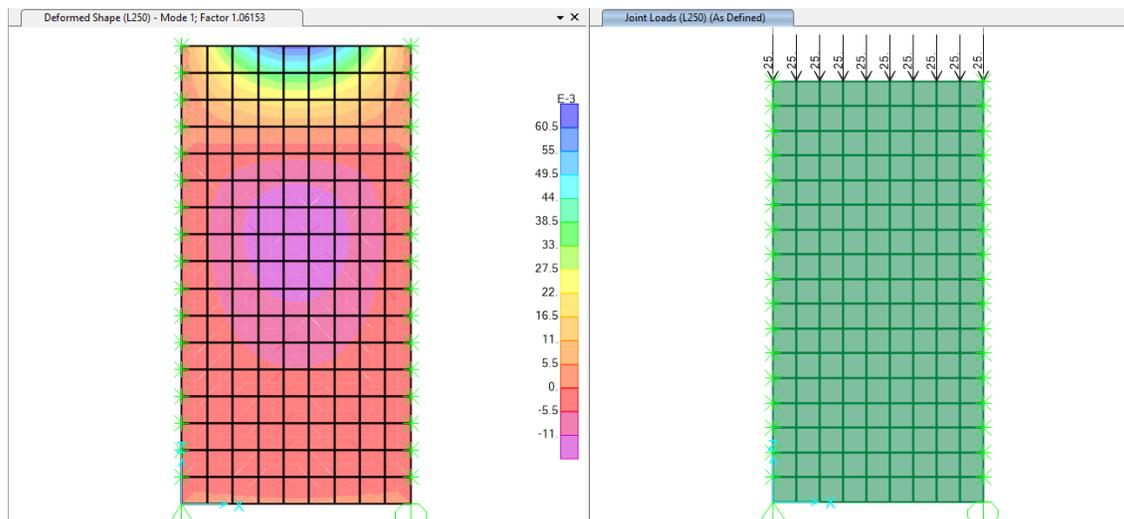
**Figura 53**

*Elementos cuadrados de 200x200mm*



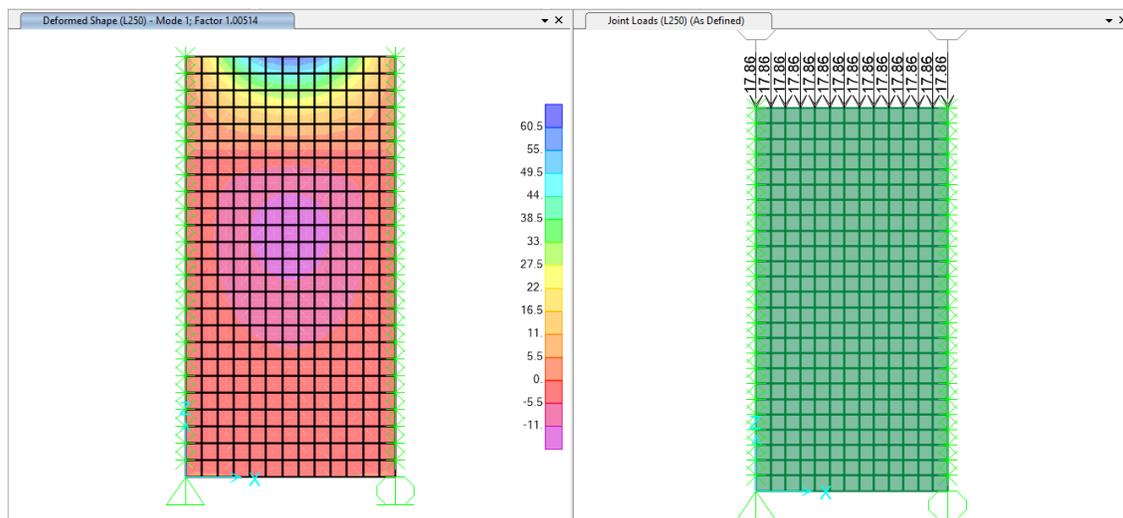
**Figura 54**

*Elementos cuadrados de 150x150mm*



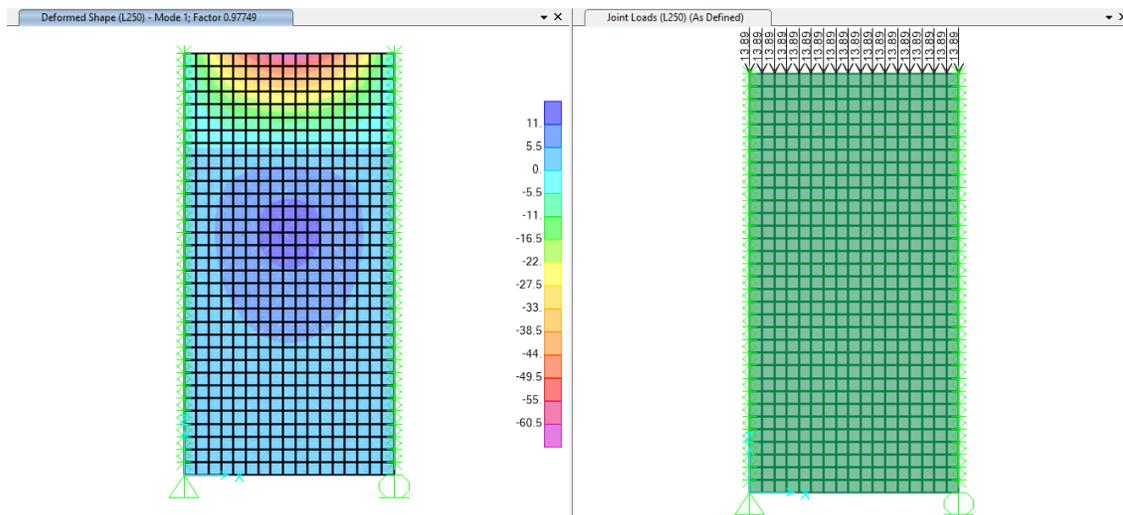
**Figura 55**

*Elementos cuadrados de 100x100mm*



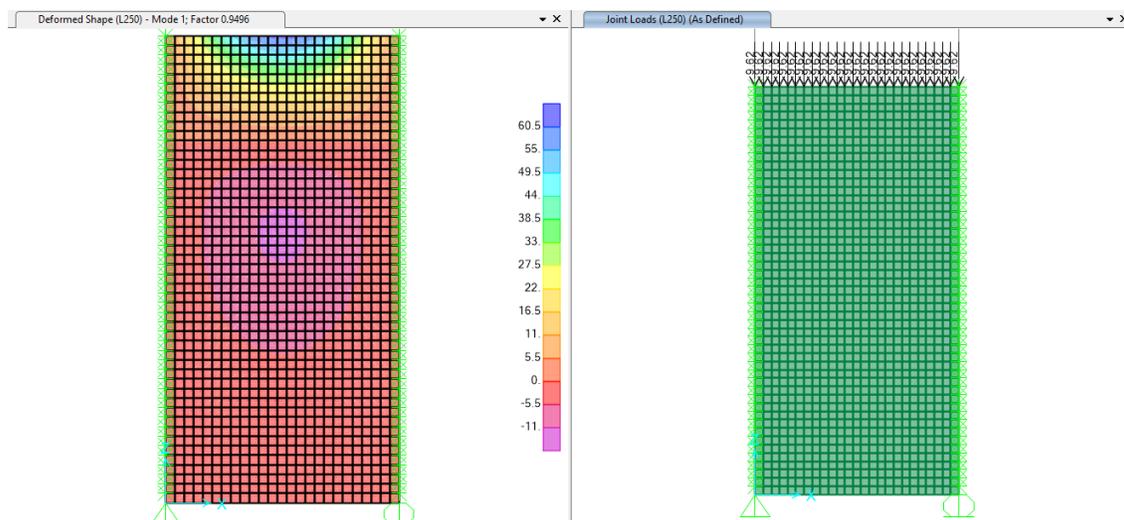
**Figura 56**

*Elementos cuadrados de 75x75mm*



**Figura 57**

*Elementos cuadrados de 50x50mm*



A continuación, se presenta la tabla 17 donde se resume el análisis del tablero OSB con diferente cantidad de particiones (elementos finitos) desde 500x500mm a 50x50mm.

**Tabla 17**

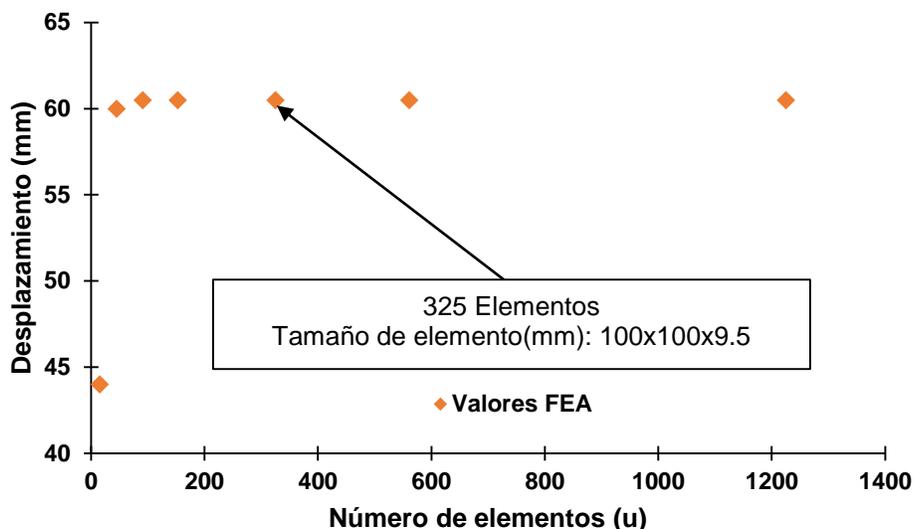
*Comportamiento de elementos finitos*

Dimensión de elementos (mm)	Número de elementos (u)	Desplazamiento (mm)
500x500	15	44
300x300	45	60
200x200	91	60.5
150x150	153	60.5
100x100	325	60.5
75x75	561	60.5
50x50	1225	60.5

En la figura 58 se presenta la gráfica del estudio de convergencia en el cual se aprecia que a partir de elementos de 200x200mm se mantienen los desplazamientos constantes, por lo que decide trabajar con elementos de 100x100mm.

**Figura 58**

*Curva de convergencia de elementos finitos*



## **Modelamiento estructural de vivienda a base de fardos de paja y mochetas de madera**

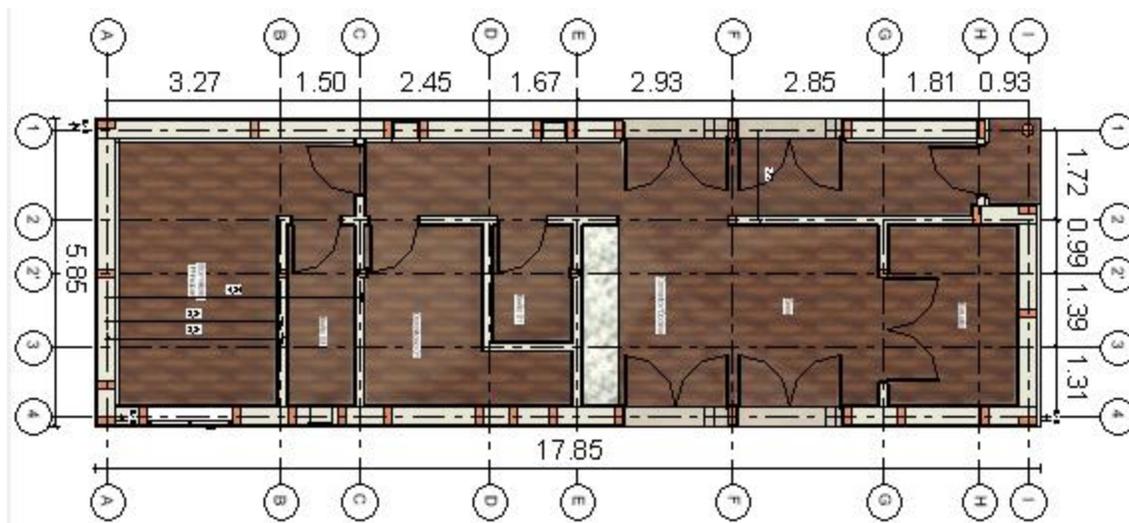
### ***Propiedades geométricas***

Para la modelación de una vivienda a base de fardos de paja y mochetas de madera con paneles OSB, se toma como referencia la estructura presentada en (Viera, 2022), la cual ha sido construida en la ciudad de Sangolquí.

La estructura tiene forma rectangular con 5.85 m de ancho por 17.85 m de largo, su ocupación está destinada para vivienda unifamiliar que está compuesta de una sala, comedor, estudio, dormitorio, baño, y un dormitorio master, en la figura 59 se muestra la planta arquitectónica de la estructura de estudio.

**Figura 59**

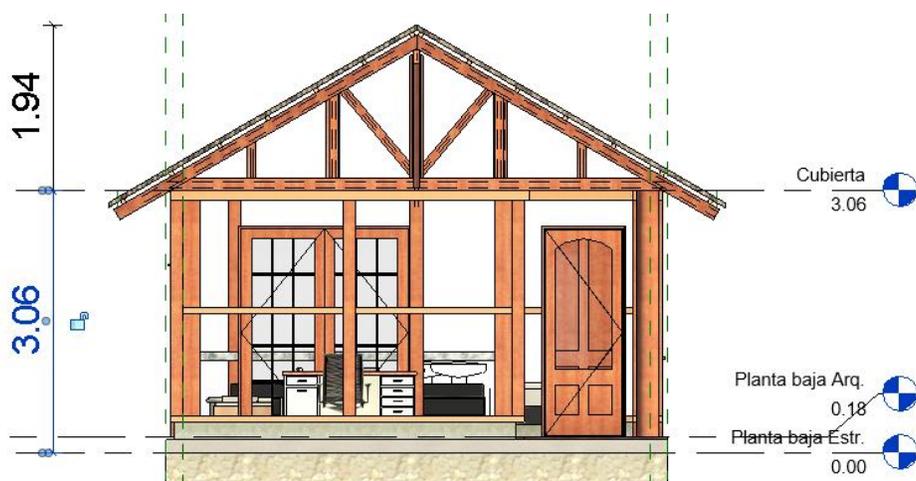
*Vista en planta, primer piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja*



La estructura cuenta con un solo nivel el cual llega hasta una altura de 3.06m, además se compone de una cubierta a dos aguas con una altura de 1.94 m dando como resultado una altura total de la estructura de 5.00 m como se indica en la figura 60.

**Figura 60**

*Vista en planta, Segundo piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja*



### **Condiciones de borde**

Para el análisis de la estructura se utilizará una restricción empotrada la cual impide el movimiento en cualquier dirección, ubicado en cada una de las mochetas elaboradas con madera y paneles OSB.

En este caso también se modelará al tablero OSB como un elemento tipo Shell de las mismas características y a la vez constituirá los muros de la estructura.

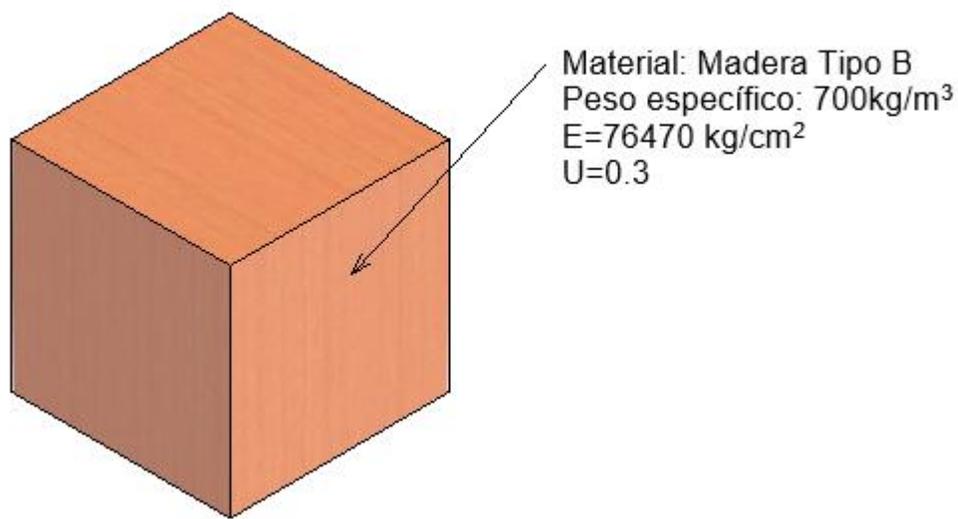
### **Propiedades mecánicas**

Se utilizará los valores obtenidos de los ensayos realizados a las probetas de los tableros OSB, se procede a definir los materiales, se ingresa un módulo de elasticidad de 15290 kg/cm<sup>2</sup>, peso específico de 600kg/m<sup>3</sup>, y módulo de poisson de 0.3, como se pudo apreciar en la figura 46.

De la misma forma se introduce las propiedades para una madera Tipo B: módulo de elasticidad de 76470 kg/cm<sup>2</sup> y peso específico de 700 kgf/m<sup>3</sup> (NEC-Estructuras de Madera, 2015).

### **Figura 61**

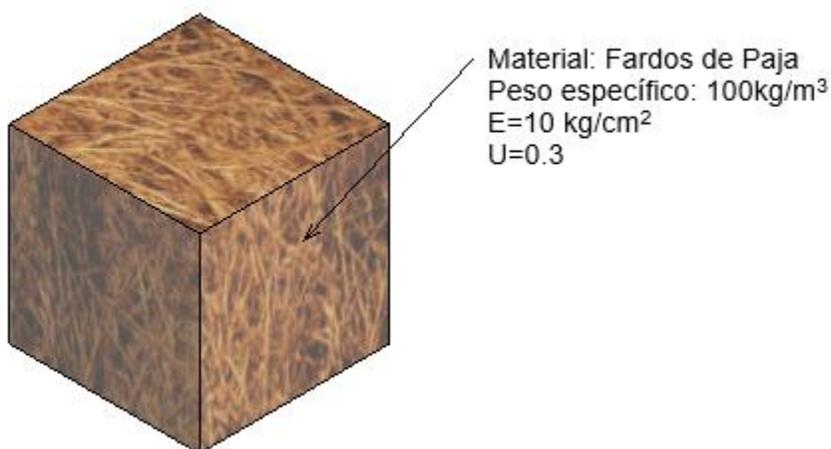
*Propiedades de la madera solida*



Por último, se ingresa las propiedades de los fardos de paja que cuentan con un módulo de elasticidad de  $10 \text{ kg/cm}^2$  y un peso específico de  $100 \text{ kg/m}^3$  como se aprecia en la figura 62 (Pachala & Rosero, 2016).

### Figura 62

*Propiedades de los fardos de paja*

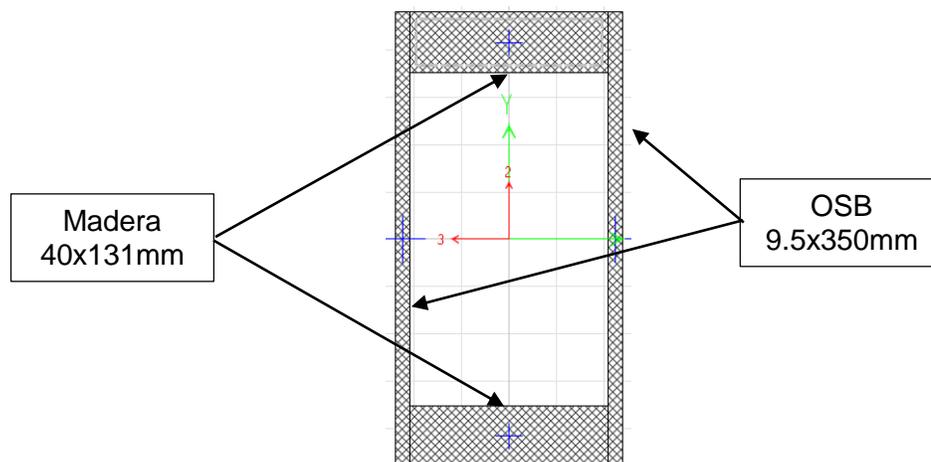
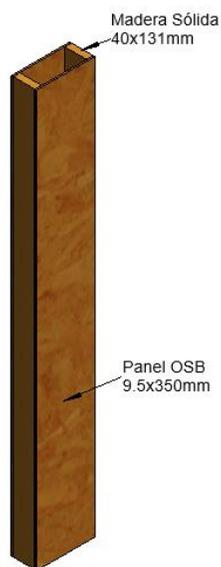


### **Elementos estructurales**

#### **Columnas**

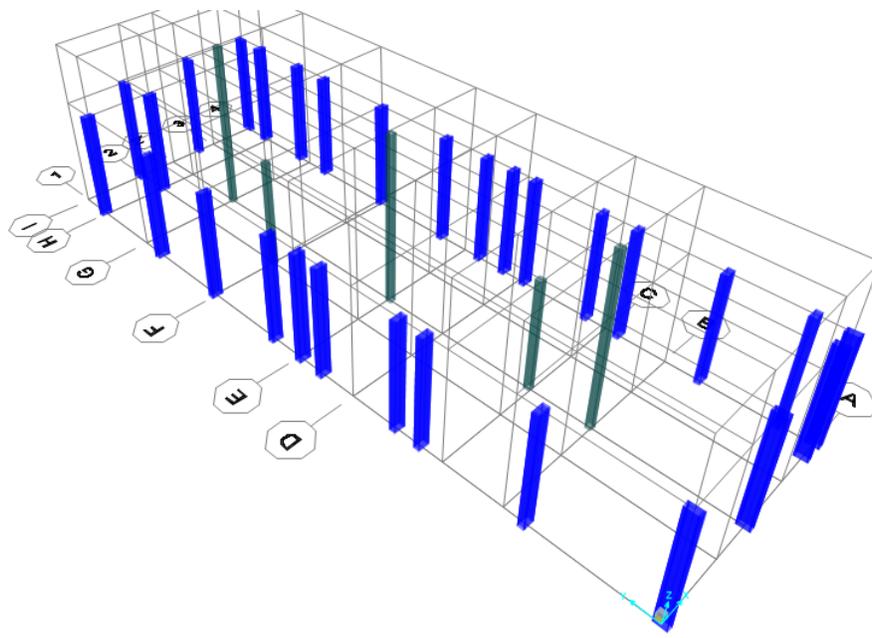
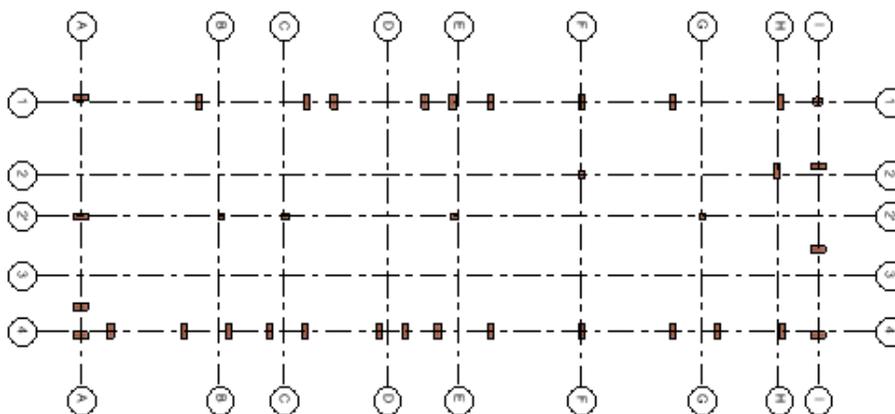
#### **Mochetas**

Para la elaboración de las mochetas se lo realizo mediante el módulo “Section designer” de software utilizado, donde se creó las secciones de acuerdo a cómo serán construidas, las dimensiones de estas mochetas son de 15cm de ancho por 35cm de largo, cabe recalcar que estas mochetas están compuestas de dos tipos de materiales por una parte se compone de dos paneles OSB de 9.5mm con una dimensión de  $9.5 \times 350 \text{ mm}$ , por otro lado, por dos elementos de madera solida con dimensiones de  $40 \times 131 \text{ mm}$ . Se presenta la modelación en la figura 63.

**Figura 63***Modelación de columnas tipo mochetas***Figura 64***Vista 3D-Mocheta***Elementos interiores**

Para las columnas interiores de la estructura se utilizó un elemento de madera solida de 150x150mm, que sirven de apoyo para la viga de cubierta.

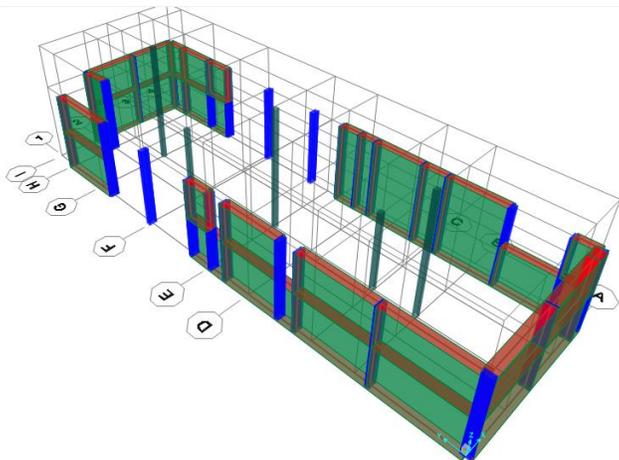
Para apreciar de una mejor manera se presenta la modelación de estos elementos en el software de análisis según los planos arquitectónicos.

**Figura 65***Vista 3d de los elementos columna***Figura 66***Vista en planta-Elementos Columnas***Muros de fardos de paja**

De acuerdo a los planos arquitectónicos las dimensiones de los fardos de paja son 35x48x150cm, por otro lado, para su modelación se ha utilizado un elemento tipo Shell con un espesor de 35 cm y están ubicados como se muestra en la figura 67.

## Figura 67

*Vista 3d de los muros de fardos de paja*

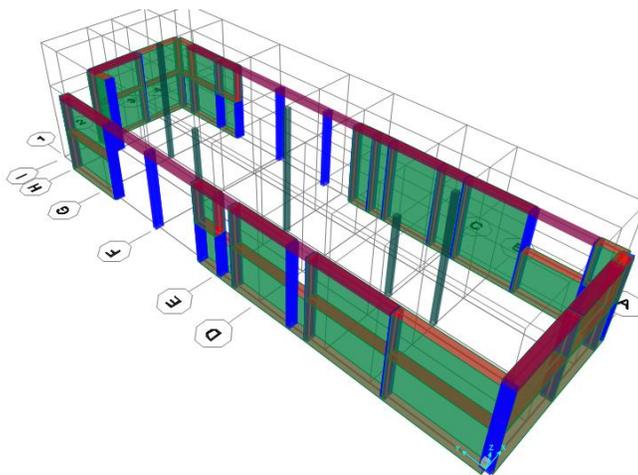


## Vigas

Para la modelación de vigas se creó elementos de madera solida de 110x350mm, ubicados en la parte superior tanto de las mochetas como de los fardos de paja (ver figura 68).

## Figura 68

*Vista 3d de los elementos viga*



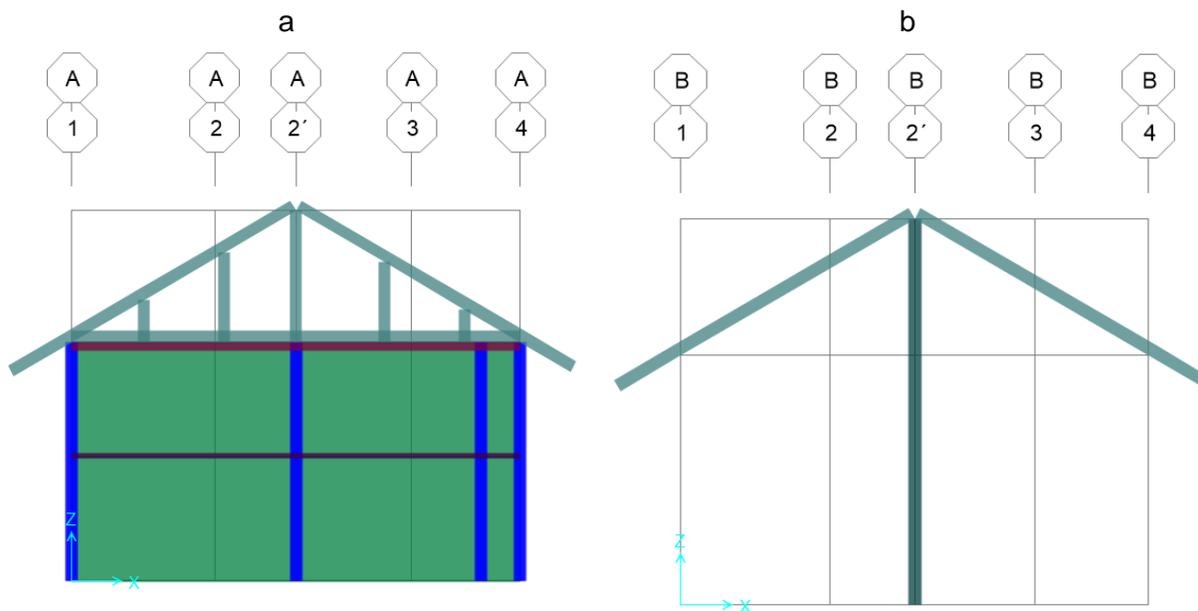
## Cubierta

La cubierta está compuesta de tres elementos de donde se tiene; viga principal que es de madera solida con una dimensión de 70x150mm, elementos que conforman las cerchas de 70x140mm y puntales de 70x110mm.

La estructura cuenta con dos tipos de cerchas como se muestra en las siguientes figuras.

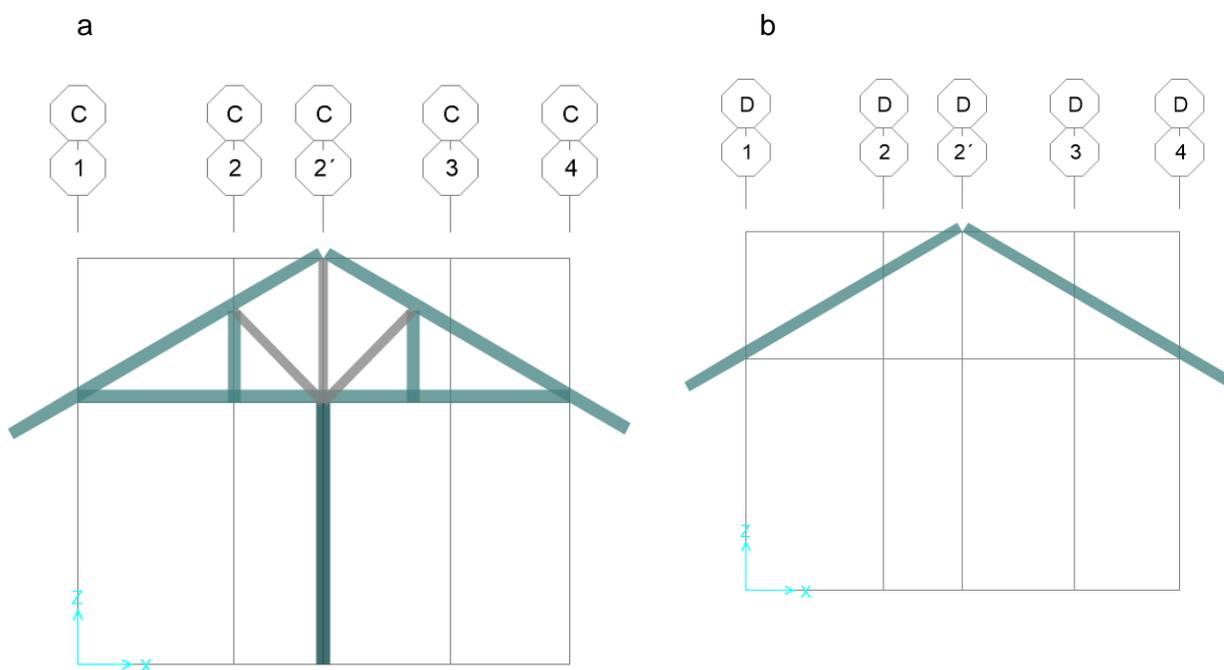
**Figura 69**

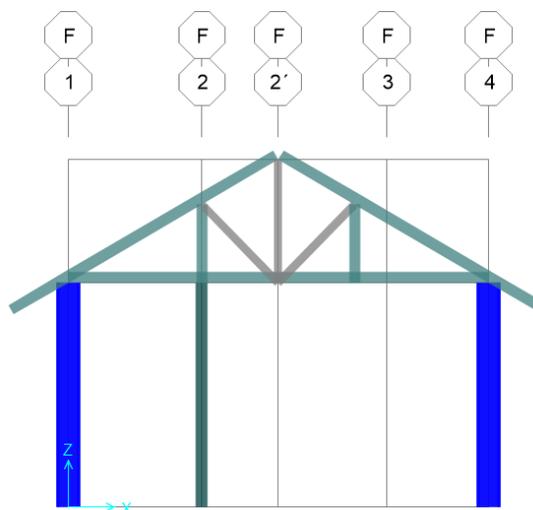
a) Cercha del pórtico A, I; b) Pórticos B, E y G



**Figura 70**

a) Pórtico C; b) Pórtico D y H



**Figura 71***Pórtico F***Condiciones de carga**

Como se pretende realizar el análisis de una estructura completa es necesario tomar en consideración todos los parámetros exigidos por la normativa vigente, por lo que se obtuvo todos los parámetros expresados en la norma ecuatoriana de la construcción (NEC-Cargas no Sísmicas, 2015).

**Cargas estáticas**

**Carga viva:** al ser una estructura cuyo uso será habitacional y solo contar con un nivel se debe considerar una carga distribuida en la cubierta, la tabla 9 del capítulo 1 de la NEC 15 establece que cuando se tiene cubiertas con inclinación se debe utilizar una carga de  $70 \text{ kg/m}^2$  (NEC-Cargas no Sísmicas, 2015).

**Carga muerta:** debido al uso de teja de barro cocido sin mortero, plancha ondulada de fibro cemento y lamina asfáltica impermeabilizante e instalaciones se tiene una carga uniforme de  $100 \text{ kg/m}^2$ .

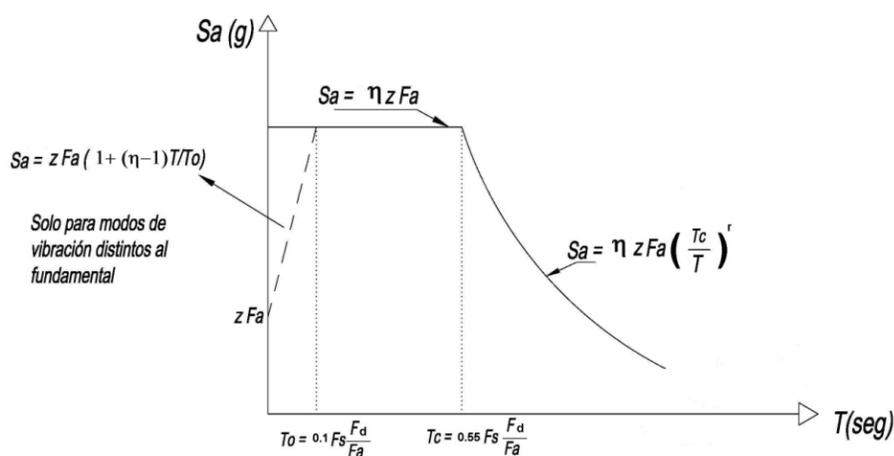
**Cargas Dinámicas**

Para la determinación de la carga sísmica se tomará como referencia que la estructura estará ubicada en Sangolquí, a partir del cual se obtienen cada uno de los parámetros expuestos en el capítulo 2 de la norma ecuatoriana de la construcción (NEC-Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente, 2015)

En la figura 72 se presenta el espectro de respuesta indicado en la NEC 2015 con cada uno de los factores que lo compone.

### Figura 72

*Espectro de respuesta*



*Nota:* Recuperado de (NEC-Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente, 2015).

En la tabla 18 se presenta cada uno de los factores requeridos para la construcción del espectro de respuesta.

### Tabla 18

*Parámetros para la creación del espectro de respuesta*

Factores del espectro de respuesta	Valor
Factor de importancia (I)	1.00
Factor de reducción de respuesta ( R )	3.00
Relación de amplificación espectral ( $\eta$ )	2.48
Factor de zona (Z)	0.40
Zona Sísmica	V
Tipo de suelo	D
Factor de sitio ( $F_a$ )	1.200

<b>Factores del espectro de respuesta</b>	<b>Valor</b>
Factor de sitio ( $F_d$ )	1.190
Factor de comportamiento inelástico del suelo ( $F_s$ )	1.280
Factor de espectro para diseño elástico ( $r$ )	1.00
Factor de irregularidad en planta ( $\phi_p$ )	0.90
Factor de irregularidad en elevación ( $\phi_e$ )	1.00

### **Periodos límites del espectro**

Periodo fundamental estimado

$$T = C_t * h n^\alpha = 0.23s$$

Periodo  $T_o$

$$T_o = 0.1 * F_s \frac{F_d}{F_a} = 0.13 s$$

Periodo  $T_c$

$$T_c = 0.55 * F_s \frac{F_d}{F_a} = 0.70s$$

Periodo máximo de vibración de la estructura

$$T_L = 2.4F_d = 2.86 s$$

### **Cálculo de la aceleración espectral**

$$S_a = \eta * Z * F_a = 0.19$$

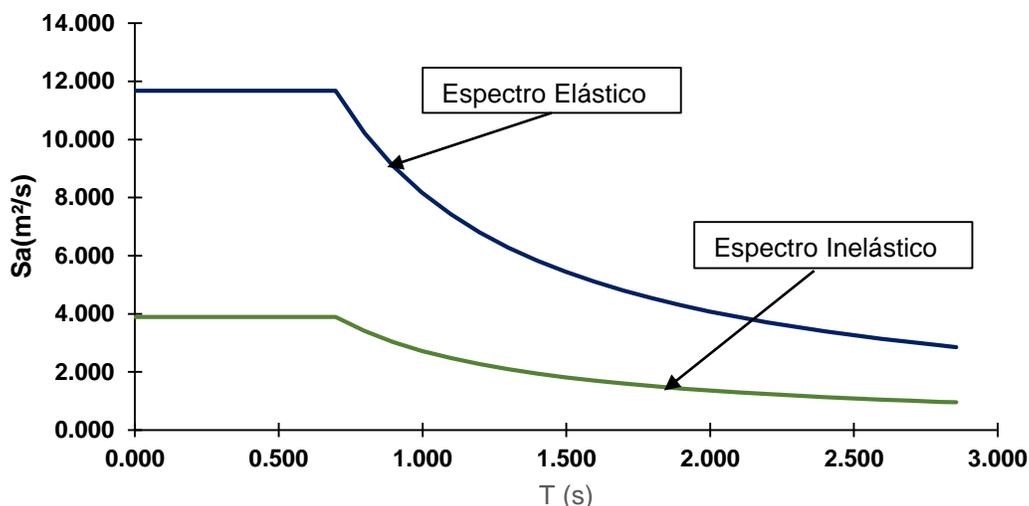
### **Cálculo del cortante Basal**

$$V = \frac{I * S_a}{R * \phi_P * \phi_E} = 0.44W\%$$

Con los parámetros antes determinados se procede a la creación del espectro de respuesta tanto elástico como inelástico, el cual se indica en la figura 73.

Figura 73

## Espectro de respuesta elástico e inelástico

**Validación de modelación numérica (Software SeismoStruct)**

Para tener una mayor seguridad y validar los resultados obtenidos en la modelación computacional con el software comercial, se procede a utilizar el software SeismoStruct que es utilizado en países europeos pero genera respuestas confiables al igual que los software comerciales utilizados en nuestro medio, otra razón para el uso de dicho software es que provee de una licencia académica original a las personas que pertenezcan a una institución educativa sean estudiantes o docentes a través de un solicitud enviada desde un correo electrónico institucional adjuntando el carnet del solicitante.

Para iniciar el modelamiento en el software SeismoStruct se procede a definir los materiales, para cada una de las secciones de las que se compone la estructura, los valores de los materiales tanto peso específico y módulo de elasticidad son los obtenidos de los ensayos de laboratorio.

**Definición de materiales**

El software permite utilizar un modelo de material genérico donde es necesario ingresar los valores de peso específico y módulo de elasticidad, para los tableros OSB, se utiliza un

peso específico de 5.884 KN/m<sup>3</sup> y módulo de elasticidad de 1499436.8KPa, por otro lado para las secciones compuestas por madera solida se utiliza un peso específico de 6.865KN/m<sup>3</sup> y un módulo de elasticidad de 7499145KPa y por último para los muros compuestos de fardos de paja se utilizó un material para mampostería con un peso específico de 0.981KN/m<sup>3</sup> y un módulo de elasticidad de 980.665KPa, ver figura 74.

**Figura 74**

*Definición de materiales*

Nombre Material	Tipo Material	Propiedades Materiales	Parámetros de Revisiones basadas en código
OSB	el_mat	1.4994E+006 5.884	Material_Nuevo Resistencia_Promedio=1e20 Re
Madera	el_mat	7.4991E+006 6.865	Material_Nuevo Resistencia_Promedio=1e20 Re
Fardos-de-paja	mas_par	3500.00 150.00 1.9250E+006 0.20 0.002 1.00 0...	Material_Nuevo Resistencia_Vertical_Media=3500
S420	stl_mp	2.0000E+008 483000.00 0.005 20.00 18.50 0.15 ...	Material_Nuevo Resistencia_Promedio=483000.0

*Definición de secciones*

Para definir las columnas tipo mochetas se asigna una sección tubular con un área equivalente de dimensiones 150x350x18.5mm, mientras que para los elementos vigas, puntales y cerchas que conforman la cubierta, se asignó una sección rectangular maciza, también se creó la sección rectangular de 288x35cm que servirá para modelar los muros de fardos de paja, en la figura 75 se presenta las secciones que forman parte de la estructura.

**Figura 75**

*Definición de secciones de la estructura*

Nombr...	Tipo de...	Materiales ...	Dimensiones Sección	Disposición Armadura	Arma...	Armadura t...
Mochet...	rhs	OSB	0.15000 0.35000 ...			
V350x110	rss	Madera	0.35000 0.11000			
V350x70	rss	Madera	0.35000 0.07000			
Col150...	rss	Madera	0.15000 0.15000			
V70x150	rss	Madera	0.07000 0.15000			
V70x140	rss	Madera	0.07000 0.14000			
V70x100	rss	Madera	0.07000 0.10000			
D250	css	Madera	0.25000			
C50x50	rss	Madera	0.05000 0.05000			
fardosm	mws	S420 S42...	2.88000 0.35000 ...	esquinas(0@10mm) Borde...		(0-0)@10m...
fardosv2	mws	S420 S42...	1.51000 0.35000 ...	esquinas(0@10mm) Borde...		(0-0)@10m...

### Definición de tipo de elementos

Se define el tipo de cada elemento según el uso ya sea viga o columna mediante la elección de la categoría “Elemento inelástico de pórtico con rótula plástica basada en fuerzas (infrmFBPH)”, para los muros elaborados con fardos de paja se elige la categoría mampostería (masonry).

### Figura 76

Definición de tipo de elemento para viga-columna

infrmFB	infrmFBPH	infrmDBPH	infrmDB	elfrm	truss	infill	rack	masonry
La clase de ele...	Nombre Sección	Fibras Sección	Longitud de rótula plástica Lp/L(%)	Amorti				
col-mocheta	Mocheta150x350x18-5	150	16.67	Ningun				
col-D250	D250	150	16.67	Ningun				
col-150x150	Col150x150	150	16.67	Ningun				
viga-350x110	V350x110	150	16.67	Ningun				
viga-V350x70	V350x70	150	16.67	Ningun				
viga-V70x150	V70x150	150	16.67	Ningun				

### Figura 77

Definición de tipo de elemento para mampostería

infrmFB	infrmFBPH	infrmDBPH	infrmDB	elfrm	truss	infill	rack	masonry
La clase de ele...	Nombre Sección	Fibras Sección	Reducción de Rigide...	Capacidad Total de ...	Capacidad de De			
muro-fardo	fardosm	150	0.50	0.20	0.40			
muro-fardosv2	fardosv2	150	0.50	0.20	0.40			

### Definición de nodos y elementos

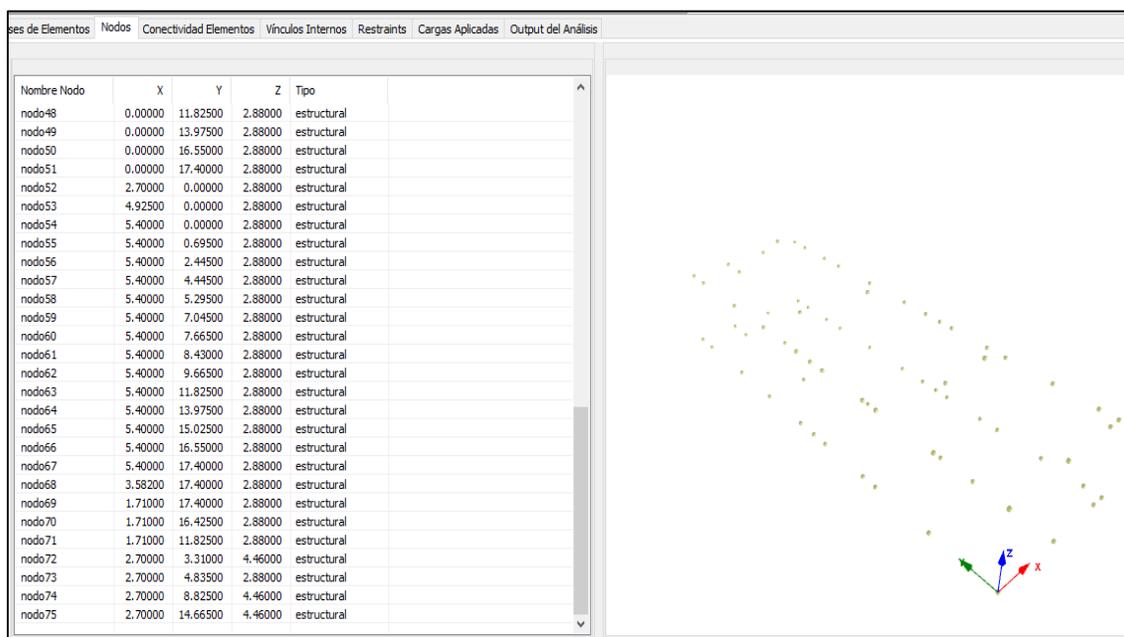
#### Columnas

Para representar las columnas tipo mochetas conformadas por dos paneles OSB de 350x9.5mm y dos secciones rectangulares de 131mmx40mm, como el software no cuenta con este tipo de secciones se procedió a escoger una sección tubular hueca de dimensión 150x350x18.5mm que representa un área equivalente a la sección original.

Para realizar el dibujo de estos elementos se precisa de una base de datos con las coordenadas de cada punto en las tres direcciones X, Y, Z, en la figura 78 se presenta los nodos de cada una de las mochetas, así como las columnas interiores que son de madera solida de sección rectangular de dimensión 150x150mm.

**Figura 78**

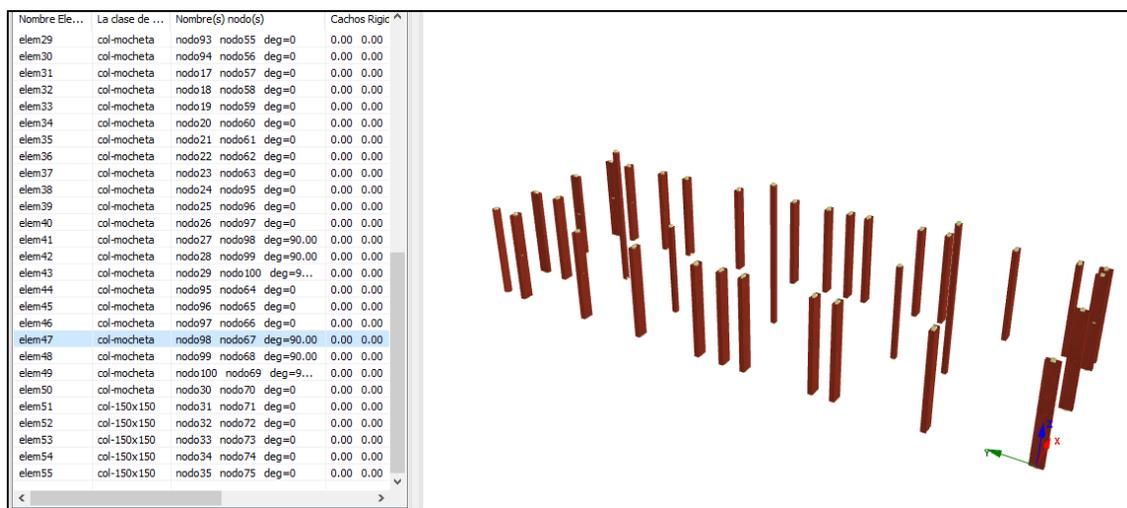
*Ingreso de coordenadas de nodos para columnas*



En la figura 79 se presenta la unión de los nodos ingresados previamente para conformar las columnas con las diferentes secciones, además se orienta las columnas de acuerdo a los planos arquitectónicos.

Figura 79

Unión de puntos para conformar columnas

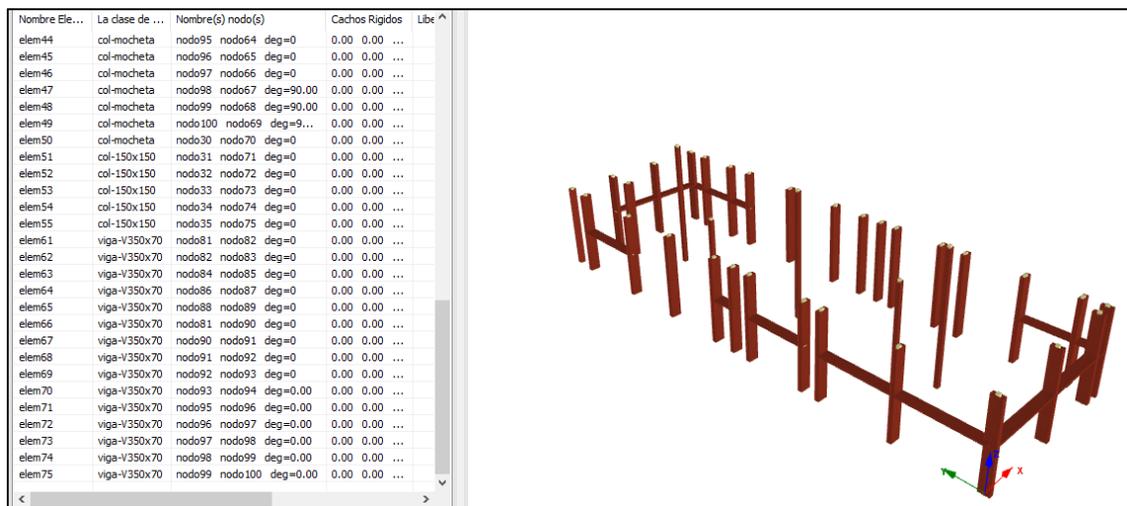


## Vigas

Otra forma de dibujar los elementos estructurales es unir los puntos en el mismo software, de acuerdo a la ubicación de cada uno de estos elementos, en la figura 80 se puede apreciar la viga tipo escalerilla de madera solida de 350x70mm que se ubica a una altura de 1.51m del nivel de piso terminado.

Figura 80

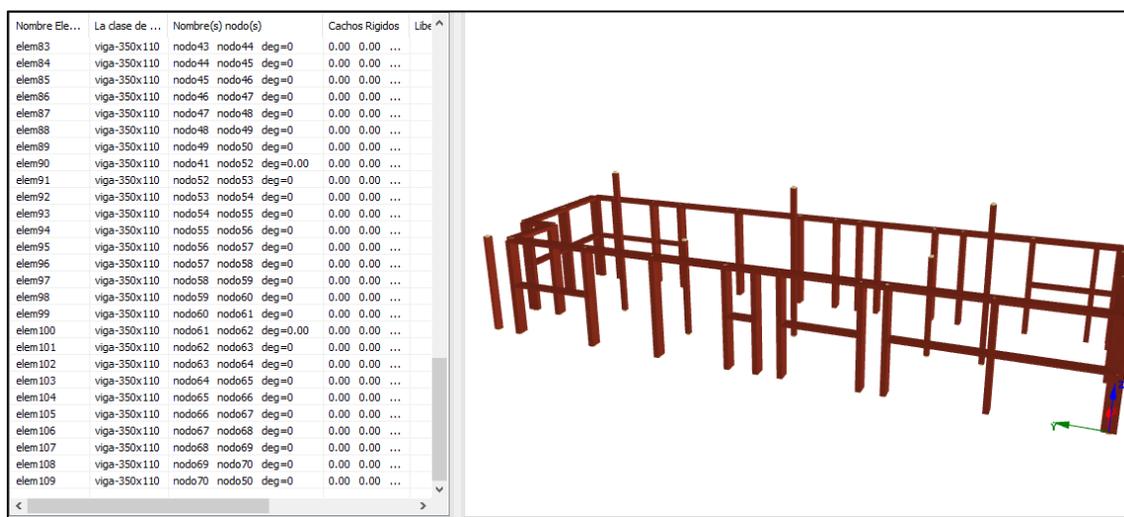
Dibujo de viga tipo escalerilla de 350x70mm



De la misma forma se asigna la viga tipo escalerilla de dimensión 350x110mm ubicados en la parte superior de las columnas tipo mocheta a lo largo de todo el perímetro de la estructura como se aprecia en la figura 81.

**Figura 81**

*Dibujo de viga tipo escalerilla de 350x110mm*

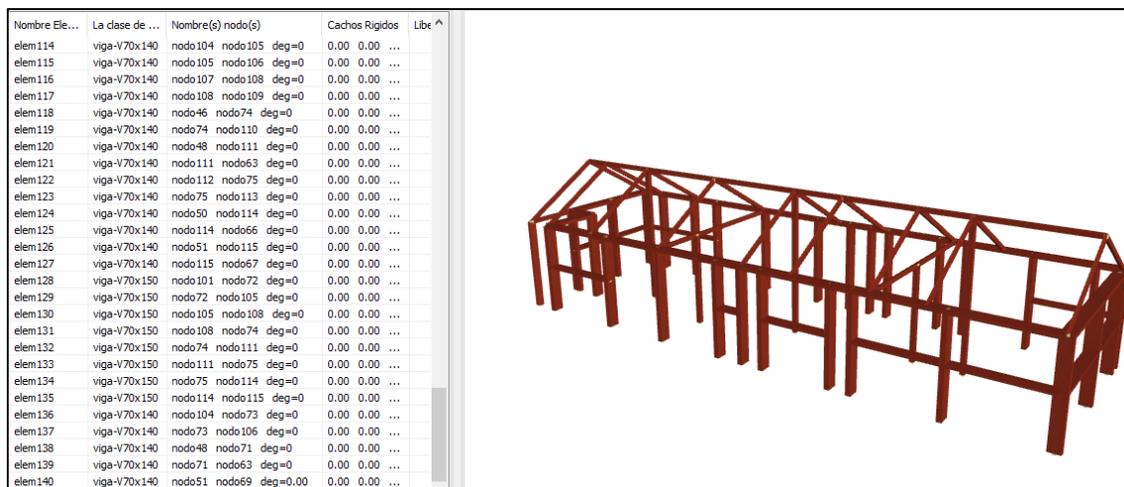


## Cerchas

Se dibuja las cerchas de dimensión 70x140mm que conforman la cubierta de acuerdo a los planos arquitectónicos, también se utiliza puntales de sección 70x100mm y por último se utiliza una viga de sección 70x150mm como cumbrera en la figura 82 se puede ver cada una de las secciones que conforma la cubierta.

Figura 82

Dibujo de los elementos de cubierta

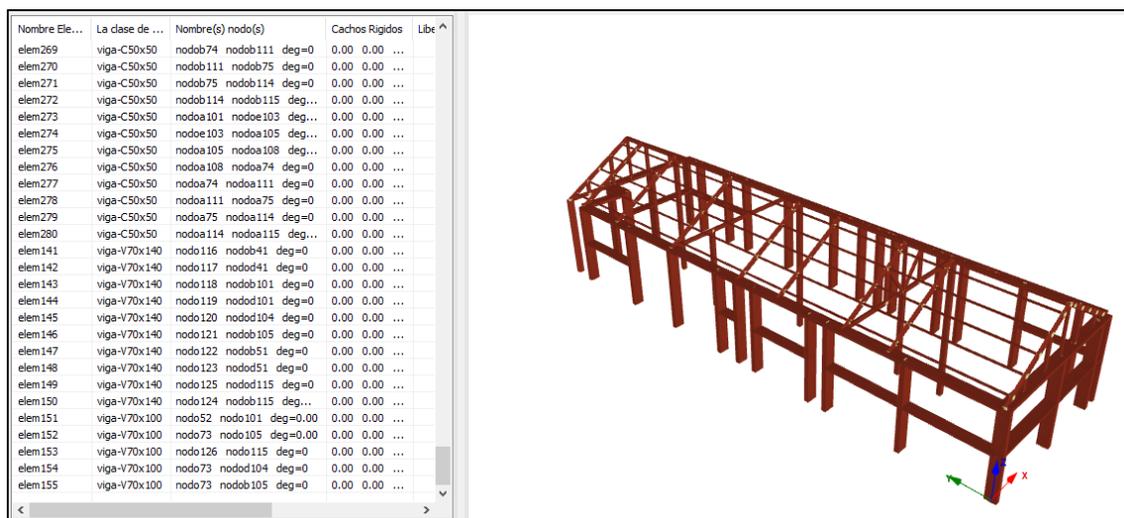


### Correas

De la misma manera se procede a dibujar las correas que tienen una dimensión de 50x50mm y a su vez van a estar apoyadas en las cerchas de la cubierta ver figura 83.

Figura 83

Dibujo de las correas de 50x50

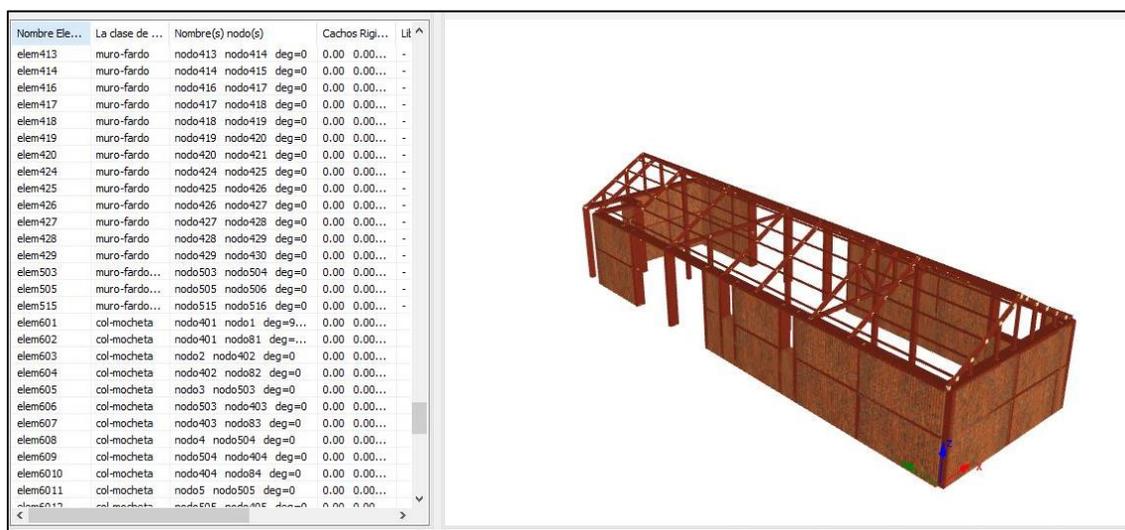


## Muros de fardos de paja

Por último, se modelan los muros elaborados con fardos de paja de dimensión 35x48x150mm, mediante el uso de un elemento tipo masonry, en la figura 84 se indica la estructura con los cada uno de los elementos que la conforman.

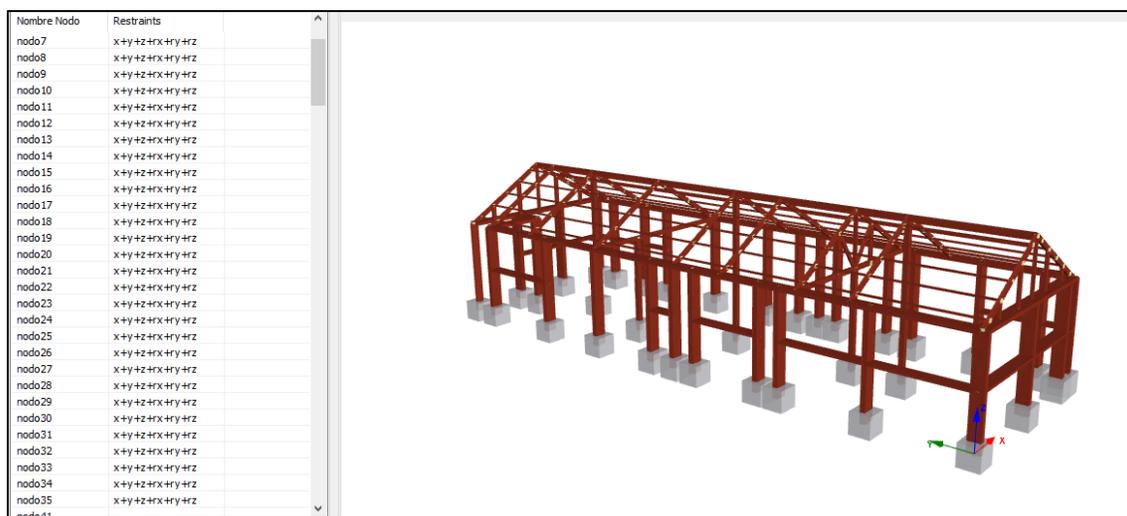
**Figura 84**

*Dibujo de muros de fardos de paja*



## Condiciones de borde

Se asigna un apoyo de empotramiento en la base de las columnas (mochetas) lo cual impide el movimiento en las 6 direcciones (6GDL) como se puede ver en la figura 85.

**Figura 85***Asignación de condiciones de borde*

### **Estudio de vibración ambiental**

En el análisis de la vibración ambiental se toma en cuenta tanto las rigideces de los elementos que conforman la estructura, así como las cargas utilizadas, con estos parámetros el software utilizado se encarga de generar los resultados de periodos, frecuencias y modos de vibración de la estructura.

Para el modelo analizado se tiene una mayor rigidez en el sentido longitudinal al contrario que el sentido transversal. Otro de los puntos analizados es el periodo fundamental de la estructura que de igual manera se los obtiene al realizar un análisis modal en la estructura.

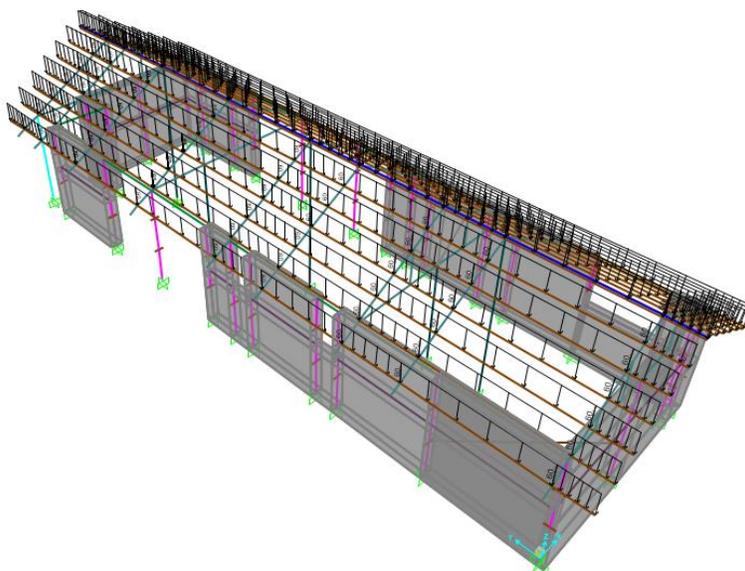
### ***Análisis modal con el software comercial***

#### **Modelación de la estructura con carga temporal (CT)**

En un primer modelo realizado en el software comercial se analiza la estructura aplicando una carga temporal de 100 kg/m<sup>2</sup>, en la figura 86 se indica la aplicación de la carga en las correas de la estructura.

**Figura 86**

*Carga temporal (CT) aplicada en la cubierta*



En la tabla 19 se presentan los resultados del análisis modal, tanto periodos como masas participativas.

**Tabla 19**

*Análisis modal con carga temporal (CT)*

<b>Modo (u)</b>	<b>Period (s)</b>	<b>UX (%)</b>	<b>UY (%)</b>	<b>SumUX (%)</b>	<b>SumUY (%)</b>	<b>RZ (%)</b>	<b>SumRZ (%)</b>
9	0.547	0.00%	24.40%	1.10%	58.80%	0.00%	3.10%
22	0.410	75.10%	0.01%	80.50%	63.10%	8.80%	19.30%
23	0.299	2.40%	0.00%	82.90%	63.10%	53.30%	72.60%
24	0.277	1.80%	0.26%	84.70%	63.30%	0.77%	73.40%
25	0.274	0.08%	0.01%	84.70%	63.30%	0.00%	73.40%
30	0.237	0.01%	8.10%	87.80%	72.20%	0.09%	82.30%
31	0.235	0.00%	1.80%	87.80%	74.10%	0.04%	82.40%
32	0.234	0.00%	0.00%	87.80%	74.10%	0.00%	82.40%
33	0.233	0.12%	5.60%	87.90%	79.60%	0.00%	82.40%
34	0.232	0.00%	0.44%	87.90%	80.10%	0.02%	82.40%
35	0.231	0.05%	0.53%	87.90%	80.60%	0.00%	82.40%

**Modelación de la estructura solo con carga permanente (CP)**

Se realizó una segunda modelación en el software comercial en el cual se toma en cuenta solo el peso propio de los elementos que conforman la estructura.

En la tabla 20 se presenta los resultados del análisis modal de la vivienda elaborado con fardos de paja, en ella se aprecia los diferentes periodos como participación modal de cada modo.

**Tabla 20**

*Participación modal de la estructura (CP)*

Modo (u)	Period (s)	UX (%)	UY (%)	SumUX (%)	SumUY (%)	RZ (%)	SumRZ (%)
1	0.188	0.00%	54.30%	0.00%	54.30%	0.14%	0.14%
2	0.149	36.20%	0.00%	36.20%	54.30%	43.20%	43.30%
3	0.133	33.90%	0.41%	70.10%	54.70%	32.50%	75.80%
4	0.128	11.10%	1.30%	81.10%	56.00%	5.10%	80.90%
5	0.115	0.05%	26.20%	81.20%	82.20%	0.09%	81.00%
6	0.114	1.30%	2.30%	82.50%	84.50%	1.10%	82.00%
7	0.108	0.07%	0.07%	82.60%	84.60%	0.79%	82.80%
8	0.107	0.00%	0.05%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
9	0.107	0.00%	0.03%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
10	0.106	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
11	0.099	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
12	0.099	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%

En la tabla 21 se presenta tanto los periodos como las frecuencias de la estructura.

**Tabla 21**

*Periodos y frecuencias de la estructura*

Modo (u)	Period (s)	Frequency (1/s)
1	0.188	5.328
2	0.149	6.716
3	0.133	7.536
4	0.128	7.833
5	0.115	8.724
6	0.114	8.781
7	0.108	9.278
8	0.107	9.334

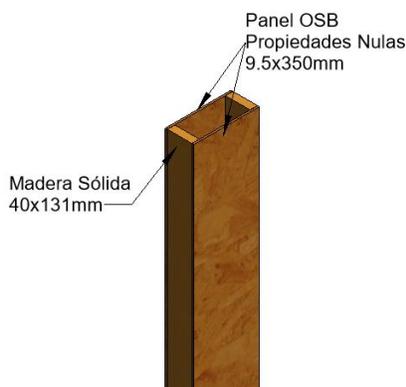
### **Análisis modal solo con fardos de paja**

A continuación, se tiene la modelación de la casa realizada con fardos de paja y columnas tipo mochetas donde se asume como nulas las propiedades de los tableros OSB para identificar el comportamiento estructural de los fardos de paja.

En la figura 87 se indica la sección de las mochetas tipo columnas que se anulara las propiedades mecánicas.

**Figura 87**

*Secciones de mocheta con propiedades nulas*



En la tabla 22 se presenta los resultados del análisis modal del comportamiento de la estructura.

**Tabla 22**

*Análisis modal con propiedades del OSB nulas*

<b>Modo (u)</b>	<b>Period (s)</b>	<b>UX (%)</b>	<b>UY (%)</b>	<b>SumUX (%)</b>	<b>SumUY (%)</b>	<b>RZ (%)</b>	<b>SumRZ (%)</b>
10	0.221	0.03%	70.90%	0.70%	72.10%	0.23%	0.56%
11	0.191	20.70%	0.05%	21.40%	72.20%	32.20%	32.80%
15	0.162	45.60%	0.01%	21.40%	72.20%	26.60%	74.10%
16	0.159	4.50%	0.01%	82.80%	72.40%	3.40%	77.50%
17	0.132	0.00%	0.04%	82.80%	72.50%	5.60%	83.10%
18	0.128	0.00%	13.00%	82.80%	85.50%	0.08%	83.20%
19	0.108	0.02%	0.00%	82.90%	85.50%	0.12%	83.30%
20	0.107	0.00%	0.00%	82.90%	85.50%	0.00%	83.30%
21	0.107	0.00%	0.00%	82.90%	85.50%	0.00%	83.30%
23	0.099	0.00%	0.00%	82.90%	85.50%	0.00%	83.30%

## **Análisis modal con el software SeismoStruct**

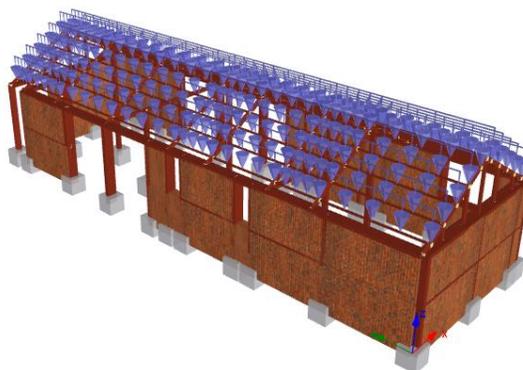
### **Modelación de la estructura con carga temporal (CT)**

Por otro lado, para la validación de los resultados obtenidos con el software comercial se presenta las respuestas del software SeismoStruct.

Al igual que en el software comercial se realizó la modelación de la estructura aplicando una carga temporal de 100kg/m<sup>2</sup> en la cubierta, como se puede apreciar en la figura 88.

### **Figura 88**

*Carga temporal (CT) en la cubierta*



A continuación, en la tabla 23 se presenta los resultados del análisis modal de la estructura tomando en cuenta la carga permanente de la estructura y carga temporal en la cubierta.

**Tabla 23**

*Análisis modal con carga temporal (CT)*

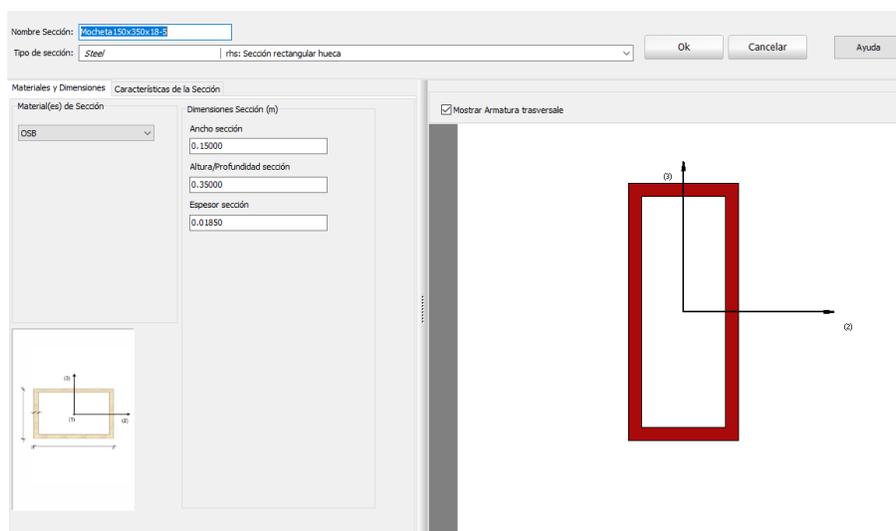
<b>Modo</b>	<b>Período</b>	<b>Ux</b>	<b>Uy</b>	<b>Uz</b>	<b>Rx</b>	<b>Ry</b>	<b>Rz</b>
1	0.508	0.00%	62.90%	0.00%	1.16%	0.00%	0.01%
2	0.433	64.21%	62.91%	0.01%	1.16%	1.27%	0.12%
3	0.308	64.25%	62.91%	0.02%	1.17%	1.28%	43.50%
4	0.245	70.49%	63.03%	0.02%	1.17%	1.29%	55.98%
5	0.237	82.65%	63.10%	0.02%	1.17%	1.29%	59.81%
6	0.211	84.94%	63.10%	0.02%	1.17%	1.86%	73.67%
7	0.189	84.94%	84.26%	0.02%	1.38%	1.86%	73.68%
8	0.178	86.47%	84.50%	0.02%	1.38%	3.32%	80.67%
9	0.171	86.55%	84.50%	0.04%	1.60%	5.22%	80.97%
10	0.170	86.55%	84.50%	9.89%	4.53%	5.30%	80.98%

## Modelación de la estructura solo con carga permanente (CP)

Así también se realizó una segunda modelación donde para el análisis modal solo se toma en cuenta la carga permanente que conforma la estructura, cabe destacar que en este modelo se utilizó una sección equivalente 1 rectangular hueca de 150x350x18.5mm y un módulo de elasticidad de los tableros OSB para las columnas tipo mochetas en la figura 89 se puede observar el tipo de sección.

**Figura 89**

*Sección equivalente 1*



En la tabla 24 se presenta los periodos y frecuencias modales obtenidas mediante la modelación con el software SeismoStruct

**Tabla 24**

*Periodos y frecuencias de la estructura (software SeismoStruct-CP)*

Modo	Período (sec)	Frecuencia (Hertz)	Frecuencia Angular (rad/sec)
1	0.1773	5.6403	35.4393
2	0.1484	6.7366	42.3274
3	0.1288	7.7610	48.7641
4	0.1236	8.0931	50.8502
5	0.1162	8.6094	54.0947
6	0.1131	8.8430	55.5620
7	0.1041	9.6093	60.3771

Modo	Período (sec)	Frecuencia (Hertz)	Frecuencia Angular (rad/sec)
8	0.0921	10.8592	68.2305
9	0.0821	12.1875	76.5766
10	0.0723	13.8342	86.9228

En las tablas 25 y 26 se presentan los porcentajes de masas participativas de cada modo, individuales y acumuladas respectivamente.

**Tabla 25**

*Masas modales participativas individuales (software SeismoStruct)*

Modo	Período	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
1	0.177	0.00%	39.82%	0.00%	1.44%	0.00%	0.08%
2	0.148	56.93%	0.00%	0.00%	0.01%	2.18%	24.48%
3	0.129	23.19%	0.03%	0.00%	0.00%	1.79%	62.01%
4	0.124	0.86%	3.81%	0.00%	0.00%	0.01%	0.05%
5	0.116	2.38%	1.01%	0.00%	0.03%	0.06%	1.10%
6	0.113	1.02%	3.19%	0.00%	0.01%	0.43%	0.32%
7	0.104	0.01%	36.41%	0.00%	0.07%	0.06%	1.54%
8	0.092	0.01%	6.47%	0.00%	0.01%	0.01%	0.43%
9	0.082	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.82%
10	0.072	0.60%	0.56%	0.01%	0.16%	0.92%	0.38%

**Tabla 26**

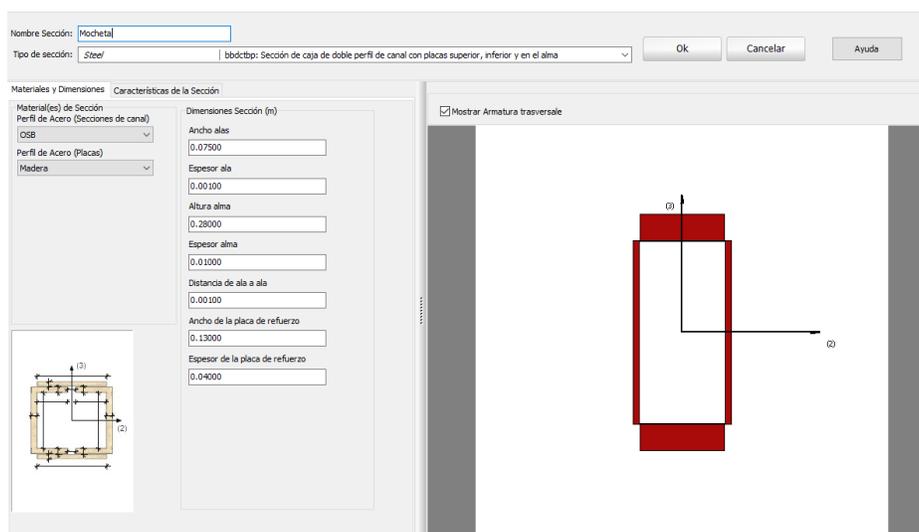
*Masas modales participativas individuales (software SeismoStruct)*

Modo	Período	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
1	0.177	0.00%	39.82%	0.00%	1.44%	0.00%	0.08%
2	0.148	56.93%	39.82%	0.00%	1.45%	2.18%	24.56%
3	0.129	80.11%	39.85%	0.00%	1.45%	3.97%	86.57%
4	0.124	80.98%	43.66%	0.00%	1.45%	3.98%	86.62%
5	0.116	83.35%	44.66%	0.00%	1.48%	4.04%	87.72%
6	0.113	84.37%	47.85%	0.00%	1.49%	4.46%	88.04%
7	0.104	84.39%	84.26%	0.00%	1.56%	4.52%	89.58%
8	0.092	84.40%	90.74%	0.00%	1.57%	4.53%	90.01%
9	0.082	84.40%	90.74%	0.00%	1.57%	4.53%	90.83%
10	0.072	85.00%	91.30%	0.01%	1.72%	5.45%	91.20%

Por último, se realizó un tercer modelo en el cual se utilizó una sección equivalente 2, constituida por dos canales C y una placa adicional, en esta sección se asignó los dos tipos de materiales de los que se compone la columna tipo mocheta tanto madera sólida como tableros de OSB, en la figura 90 se indica la sección creada.

**Figura 90**

*Sección equivalente 2*



En la tabla 27 se presenta los resultados del análisis modal de la estructura al ser analizada con el nuevo tipo sección.

**Tabla 27**

*Análisis modal con la sección equivalente 2*

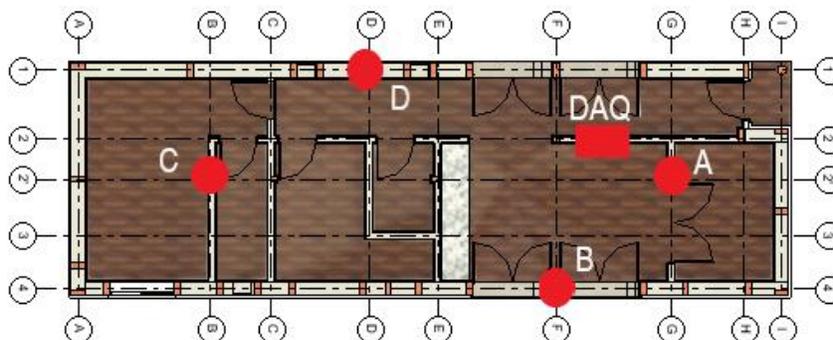
Modo	Período	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
1	0.163	0.00%	24.95%	0.00%	1.72%	0.00%	0.01%
2	0.122	0.01%	26.03%	0.00%	1.72%	0.00%	0.06%
3	0.104	56.87%	26.03%	0.02%	1.76%	5.52%	3.45%
4	0.091	57.00%	40.64%	0.05%	1.79%	5.53%	3.52%
5	0.090	57.83%	42.39%	0.09%	1.79%	5.95%	63.99%
6	0.081	72.41%	44.87%	0.10%	1.99%	6.75%	64.20%
7	0.077	75.31%	66.79%	0.10%	2.03%	6.90%	74.73%
8	0.073	75.34%	78.44%	0.10%	2.59%	6.93%	75.53%
9	0.072	75.34%	78.69%	0.10%	2.60%	6.93%	75.53%
10	0.068	76.75%	78.81%	0.15%	2.61%	6.98%	79.02%

### **Análisis modal experimental**

En el estudio realizado por (Viera, 2022), determinan la vibración ambiental mediante la utilización de un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) y 4 sensores los mismo que se ubican en distintos lugares como se aprecia en la figura 91.

**Figura 91**

*Ubicación de los instrumentos para el estudio de vibración ambiental*



Los sensores A Y C se ubicaron en columnas de madera solida mientras que los sensores B Y D se ubicaron en mochetas. La ubicación de estos sensores está pensada para obtener datos de desplazamientos rotacionales de la estructura. Se puede apreciar también un dispositivo de adquisición de datos (DAQ), donde se registra las aceleraciones de la estructura. Una vez obtenidos los datos en campo, se realiza el procesamiento de los mismos y se determinan 3 modos de vibración cada uno con su respectivo periodo y frecuencia, en la tabla 28 se apreciar estos valores.

**Tabla 28**

*Periodos y frecuencias de vibración*

	<b>Modo 1</b>	<b>Modo 2</b>	<b>Modo 3</b>
Frecuencia	5.698	6.785	7.942
Periodo	0.176	0.147	0.126

Nota: Recuperado de artículo (Viera, 2020).

En la tabla 28 indica que el modo 1 es el fundamental de la estructura de donde se tiene un periodo de  $T=0.176$  s.

## Análisis y discusión de los resultados

Una vez realizado el análisis modal de la vivienda elaborada con fardos de paja y columnas tipo mochetas construidas con paneles OSB de 9.5mm de espesor se pudo determinar lo siguiente:

A pesar de que la estructura analizada no es convencional, se puede utilizar como parámetro de control la fórmula expuesta por la NEC, para estimar en que rango debe estar el periodo fundamental de la estructura, en el análisis sísmico realizado previamente se determinó que el periodo estimado es de  $T=0.23s$ .

Por otro lado, de la tabla 20 se puede evidenciar que el periodo fundamental de la estructura se presenta en el primer modo de vibración debido a que en este modo existe la mayor participación de masa en el sentido Y, con lo que se puede concluir que el periodo fundamental tiene un valor de  $T=0.188$  s, el cual está dentro de los parámetros expuestos en la NEC 2015.

### ***Influencia de los paneles OSB en el comportamiento de la estructura***

Para poder terminar la influencia de los paneles OSB en el comportamiento de la estructura, se realizó la tabla 29 donde se presenta los resultados tanto del modelo que toma en cuenta las propiedades propias de los paneles OSB determinadas en laboratorio como los resultados del modelo donde se asumen propiedades nulas.

**Tabla 29**

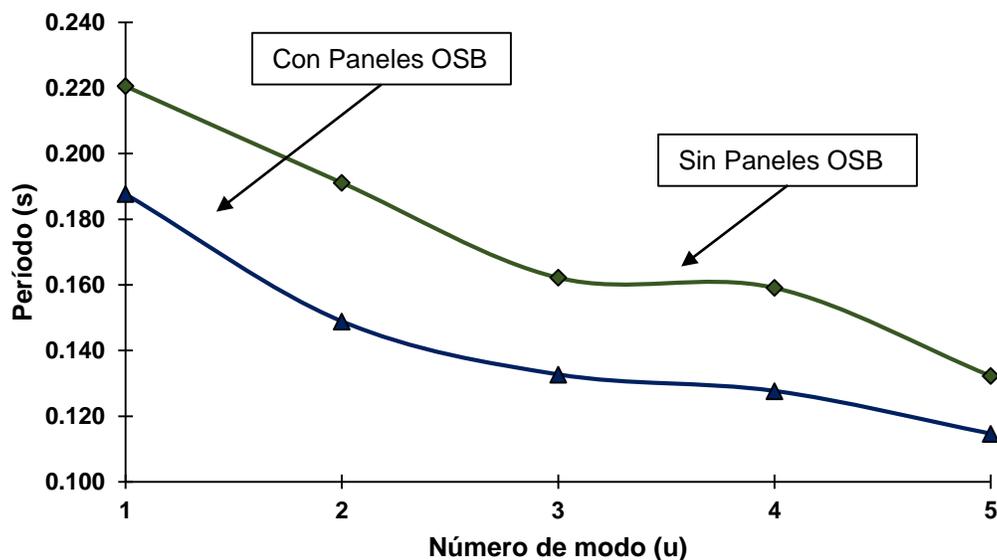
*Influencia de los paneles OSB*

Modo	Período	Con Paneles OSB			Sin Paneles OSB			
		Ux	Uy	Rz	Período	Ux	Uy	Rz
1	0.188	0.00%	54.30%	0.14%	0.221	0.03%	70.90%	0.23%
2	0.149	36.20%	0.00%	43.20%	0.191	20.70%	0.05%	32.20%
3	0.133	33.90%	0.41%	32.50%	0.162	45.60%	0.01%	26.60%
4	0.128	11.10%	1.30%	5.10%	0.159	4.50%	0.01%	3.40%
5	0.115	0.05%	26.20%	0.09%	0.132	0.00%	0.04%	5.60%

También en la figura 92 se puede ver el comportamiento del período de cada modelo analizado.

**Figura 92**

*Influencia de los paneles OSB- Comportamiento del período*



Tanto de la tabla 29 como de la figura 92, se puede identificar que los paneles OSB proveen de una mayor rigidez a la estructura. Se puede apreciar también que con respecto a la participación modal de la estructura en el modelo donde no se toma en cuenta a los tableros OSB se tiene un 16.6% más de masa participativa que en el modelo donde se considera el uso del tablero OSB.

### ***Análisis del comportamiento de las secciones equivalentes utilizadas en el software SeismoStruct.***

Al realizar el análisis de la estructura en el software SeismoStruct, utilizando dos tipos de secciones equivalentes se tiene los resultados expuestos en la tabla 30.

**Tabla 30**

*Resultados del análisis modal de la sección equivalente 1 y 2*

Modo	Sección Equivalente 1				Sección Equivalente 2			
	Período	Ux	Uy	Rz	Período	Ux	Uy	Rz
1	0.177	0.00%	39.82%	0.08%	0.163	0.00%	24.95%	0.01%
2	0.148	56.93%	39.82%	24.56%	0.122	0.01%	26.03%	0.06%
3	0.129	80.11%	39.85%	86.57%	0.104	56.87%	26.03%	3.45%
4	0.124	80.98%	43.66%	86.62%	0.091	57.00%	40.64%	3.52%
5	0.116	83.35%	44.66%	87.72%	0.090	57.83%	42.39%	63.99%

En la tabla 30 se puede apreciar que la estructura es mucho más rígida al utilizar la sección equivalente 2, pero en cambio se tiene un menor porcentaje de participación modal en las tres direcciones; Por el contrario, si muy bien el periodo de la sección equivalente 1 es mucho mayor que de la sección equivalente 2, se tiene un mayor porcentaje de masa participativa.

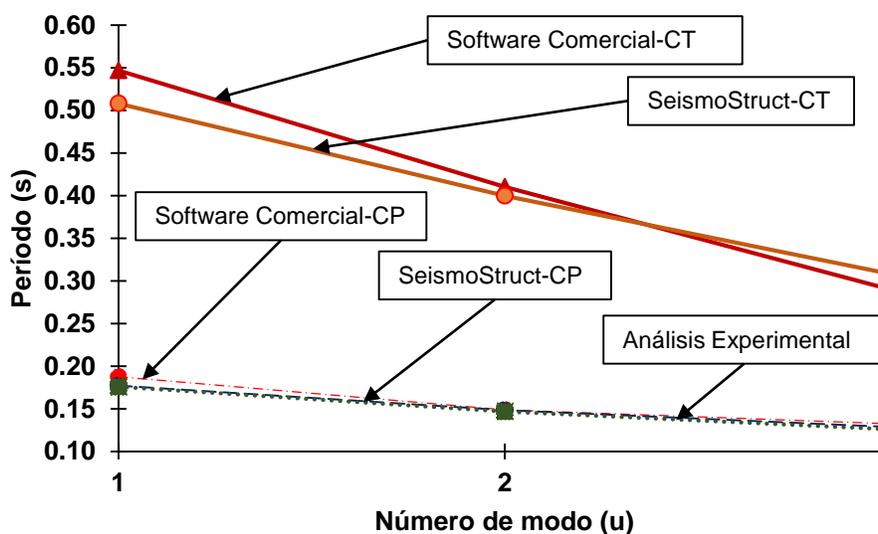
Al analizar las dos secciones equivalentes tanto en periodo como en masas participativas se optó por trabajar con la sección equivalente 1 ya que cuenta con un mejor comportamiento estructural.

### ***Comparación del análisis modal de los modelos creados***

En la figura 93 se presenta los 3 primeros periodos de cada modelo creado y a la vez se presenta los periodos del análisis experimental.

**Figura 93**

*Periodo de los modelos creados y del análisis experimental*



De la figura 93 se puede analizar dos parámetros: 1) la validación computacional de los modelos y 2) la validación del análisis computacional con el análisis experimental.

En la tabla 20 se presentó los resultados del análisis modal del software comercial mientras que en la tabla 25 se indicó los valores obtenidos en el software SeismoStruct, de igual manera en la figura 93 se puede apreciar el comportamiento para los tres primeros modos de cada software.

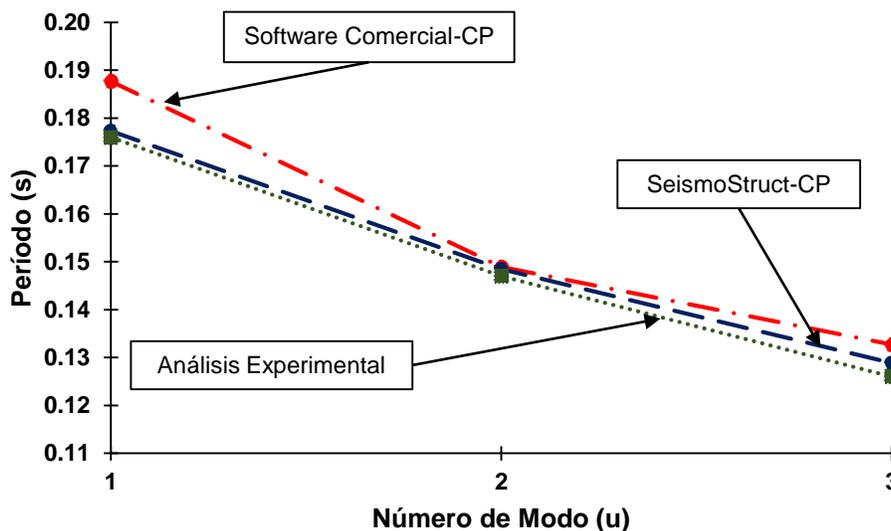
Al analizar el comportamiento de cada modelo se puede notar que para los modelos donde se toma en cuenta la carga temporal se tiene una diferencia del 7.67% entre cada uno de los periodos fundamentales, a su vez para los modelos donde solo se toma en cuenta carga permanente de la estructura se tiene una diferencia del 6.21%. Se puede concluir que el modelo numérico realizado es válido debido a que no existe una variación significativa en los resultados que reporta cada software.

Una vez validada la modelación numérica se puede identificar en la figura 93 que los modelos que tienen una mayor similitud con el análisis experimental son los que toman en cuenta únicamente la carga permanente de la estructura.

Por otro lado, en la figura 94 se presenta el comportamiento de los modelos que consideran solo carga permanente y el análisis experimental.

### Figura 94

*Comparación de resultados computacionales con análisis experimental*



De la figura 94 se puede concluir que el análisis de vibración ambiental experimental genera resultados a partir de las cargas actuantes en el momento del estudio, por esta razón se procede a realizar la comparación únicamente con los resultados de los modelos donde se toma en cuenta solo la carga permanente de la estructura.

El periodo fundamental que reporta el software SeismoStruct tiene un porcentaje de 0.10% de diferencia con respecto al periodo del análisis experimental, mientras que la diferencia con el software comercial es del 6.38%,

Si muy bien el software SeismoStruct tiene un periodo similar al determinado en el análisis experimental el comportamiento en periodos que reporta el software comercial tiene una mayor similitud con el comportamiento reportado en el análisis experimental. Por esto se concluye que la modelación numérica que tiene una mayor similitud con el análisis experimental es el realizado con el software comercial.

### **Análisis de las masas participativas**

Otro de los parámetros que se pueden analizar es el porcentaje de participación modal de la estructura.

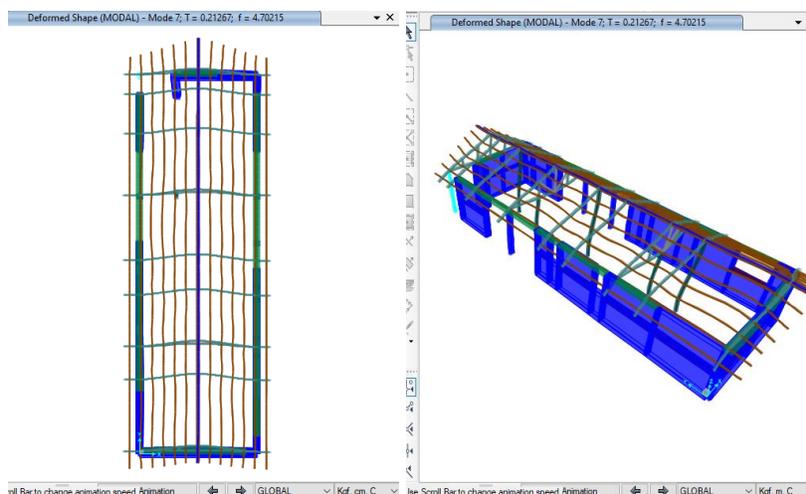
Se puede apreciar que en el software comercial en el modo número 1 predomina el desplazamiento en el sentido Y con un 54% mientras en el software SeismoStruct se tiene un 41% por el contrario en el modo numero 2 el software SeismoStruct tiene un mayor porcentaje de participación en el sentido X con un 60.57% mientras que con el software comercial se tiene un 36.20% de participación modal.

Como en el análisis de los periodos de la modelación computacional con el análisis experimental se concluyó que el software comercial tiene una mayor similitud se procede a realizar un análisis del comportamiento de la estructura modelada en el software comercial.

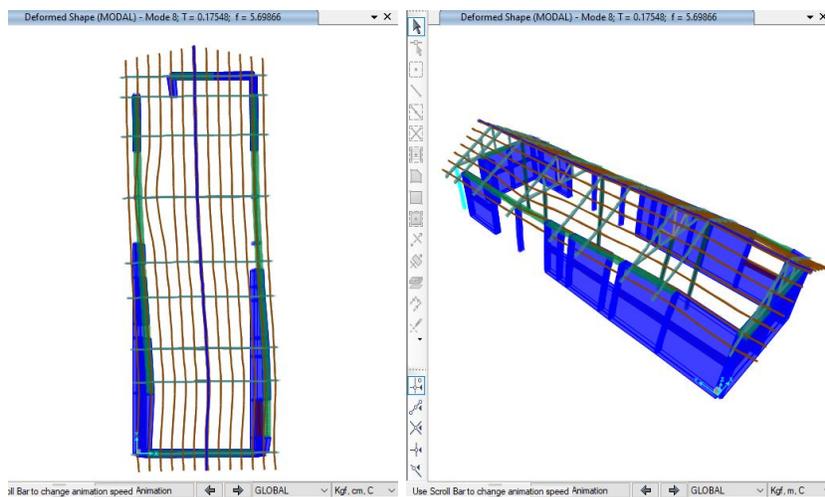
De la tabla 20 se tiene que el modo fundamental es el modo 1 con un porcentaje de participación modal de 54.30% en la dirección Y, en la figura 95 se puede apreciar el desplazamiento de este modo.

### **Figura 95**

#### *Participación modal en el sentido Y*



De igual manera en el modo 2 se presenta una participación modal del 36.20 % en la dirección perpendicular al modo fundamental o en dirección X.

**Figura 96***Participación modal en el sentido X*

En la (NEC-Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente, 2015) se expresa que la estructura debe poseer una sumatoria de participación modal superior al 90% en cada una de las direcciones, lo cual en la tabla 20 se puede apreciar que esta disposición se cumple en el modo 12.

## CAPITULO V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

- Las propiedades mecánicas de los tableros OSB determinadas en el laboratorio de acuerdo a las normas internacionales al compararlas con los valores proporcionados por la ficha técnica tienen una variación del 18.03% con respecto a la densidad específica y de un 4.28% al comparar el módulo de elasticidad.
- La carga crítica a pandeo determinada mediante la modelación numérica tiene una diferencia del 59% con respecto a la carga a compresión promedio determinada de los ensayos de laboratorio, esta variación se da a razón que en el programa permite realizar un modelo ideal mientras que en el laboratorio se puede tener muestras irregulares lo que no permite realizar una compresión pura, o a su vez genera desplazamiento lateral lo que provoca variación en los resultados.
- De la modelación de los tableros OSB, se identificó que se existe una concentración de esfuerzos en la zona central, lo cual es una característica del pandeo global con lo que se puede concluir que la modelación está ejecutada correctamente.
- De los modelos computacionales analizados al utilizar las propiedades geométricas y mecánicas del material estudiado se genera una respuesta tanto en periodos como en frecuencias similar al análisis experimental con lo que se concluye que el modelo numérico realizado valida al modelo experimental.
- La validación numérica de los modelos se realizó con dos softwares donde el software comercial permite la modelación de los elementos estructurales lo más

semejante a la realidad, mientras que el software SeismoStruct permite la modelación mediante secciones equivalentes, a pesar de esta diferencia en la modelación se concluye que la validación es aceptada a razón de que generan respuestas similares en el análisis modal.

- Los modelos computacionales de la estructura tomando en cuenta solo pesos propios tiene un 6.81% de diferencia en periodos con respecto al análisis experimental, por lo tanto, los modelos computacionales donde se considera solo pesos propios tienen una mayor similitud con respecto al análisis experimental realizado in situ.
- La modelación realizada en el software comercial genera periodos similares tanto en valor como en comportamiento a los determinados a través de un análisis experimental realiza in situ.
- Al realizar el modelamiento de la estructura sin tomar en cuenta la participación de los paneles OSB, se concluye que la influencia de estos tableros es la de proveer de una mayor rigidez a la estructura lo que se traduce en un aporte significativo a la rigidez de los fardos de paja.
- Las casas elaboradas con fardos de paja y columnas tipo mochetas pueden ser una alternativa confiable de construcción para viviendas unifamiliares además que se puede generar un ahorro significativo al utilizar materiales propios de las zonas andinas.

### **Recomendaciones**

- Para la realización de los ensayos se recomienda tener un especial cuidado en las dimensiones especificadas en la norma de cada ensayo debido a que si las

dimensiones sean ancho-largo-espesor o agujeros no son las adecuadas se pueden generar resultados erróneos.

- En la modelación computacional se recomienda modelar la estructura de la misma manera que está construida para obtener respuestas confiables, además se debe procurar que todos los elementos estén unidos entre cada uno para evitar que se tenga modos de vibración innecesarios.
- Para futuras estructuras que se realicen con este modelo constructivo se recomienda distribuir las columnas tipo mochetas de tal forma que provea de una rigidez similar en sus direcciones ortogonales.
- Al realizar la modelación analítica de la estructura ya construida se pudo identificar un porcentaje de torsión importante en la estructura por lo que se recomienda que la estructura tenga una relación ancho-largo de 1-2.

## Bibliografía

- Abbey, T. (2015). *Linear and Nonlinear Buckling in FEA*.
- Aguilera, J. (2020). *Análisis del comportamiento estructural de una edificación de mediana altura en CLT*. Concepción: Universidad del Bio-Bio.
- APA. (2017). Moisture Exposure Recommendations for Wood Structural Panels. *APA Technical Topics*, 7.
- Arizabal, Y. (2018). *Ecolodge en la laguna de Piuray, Distrito de Chinchero, Cusco: Diseño de un alojamiento contextual ecológico*. Lima: Universidad Científica del Sur.
- ASTM D2395. (2017). *ASTM D 2395-17 Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM International.
- ASTM D2719. (2001). *ASTM D 2719-01 Standard Test Methods for Structural Panels in Shear Through-the-Thickness*. ASTM International.
- ASTM D3043. (2017). *ASTM D 3043-17 Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure*. ASTM International.
- ASTM D3500. (2003). *ASTM D 3500-03 Standard Test Methods for Structural Panels in Tension*. ASTM International.
- ASTM D3501. (2016). *ASTM D3501 Standard Test Methods for Wood-Based Structural Panels in Compression*. ASTM International.
- ASTM D4442. (2003). *ASTM D 4442-03 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials*. ASTM International.
- Ávila, F. (2019). *Evaluación del comportamiento sísmico de diafragmas horizontales de madera contralaminada en edificios híbridos con muros de hormigón armado*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Ayala, S., & Vallejos, A. (2020). *Modelamiento computacional en vigas funcionalmente graduadas por el análisis de pandeo utilizando el método de elementos finitos*. Lima: Universidad de Ciencias Aplicadas.

- Balart, R., & Quiles, L. (2019). *Anisotropía en materiales. Estimación propiedades de una lamina de material compuesto en las direcciones longitudinal y transversal*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Bello, J., & Villacreses, C. (2021). Ventajas y desventajas del sistema constructivo con bambú frente al sistema de hormigón armado en viviendas de interés social. *Polo del conocimiento*, 1987-2011.
- Caguana, S. (2018). *Análisis de la transformación del sistema agrario en el territorio del Hatun Cañar, Ecuador*. Valencia: Universitat Jaume.
- Calderón, T., & Paz, C. (2017). *Análisis del comportamiento estructural de muros de corte de pino rigidizados por placas MDP, sometidos a carga lateral monotonica en su plano*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Carlosama, M. (2021). *Corbono Aéreo almacenado en un bosque nativo de Oreopanax ecuadorensis Seem en San Francisco de Cholavi, Parroquia Caranqui, Provincia de Ibarra*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
- Carrasco, E. (2012). *Estudio descriptivo de los tableros OSB (Oriented Strand Board) y su repercusión en el sector forestal Chileno*. Temuco: Universidad de la Frontera.
- Casihualpa, R. (2021). *Comparación entre el modulo de elasticidad, en tracción y compresión paralela a las fibras*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Catalán, J. (2016). *Comportamiento estructural y diseño analítico de muros de madera frente a cargas laterales*. Concepción: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- CEI-Bois. (2018). La reducción de la huella de carbono y el impacto ambiental de edificios nuevos. *Reportes ambientales para materiales constructivos*.
- Da Rocha, A., & Matuti, B. (2018). Dry construction technology, the use of OSB board in the replacement of conventional masonry. *ITEGAM-JETIA*, 138-143.
- El Comercio. (2016). Ecuador: El secreto de las casas que quedaron en pie.

- Escobar, J., & López, A. (2021). *Definición de la clase estructural de una especie de madera determinada a partir de muestras con alta comercialización en el mercado local de maderas estructurales*. Universidad EIA.
- Fernández, J. (2018). Análisis de las ventajas y desventajas de las técnicas no convencionales en la construcción de edificaciones frente a un evento sísmico. *Ingenio*, 53-71.
- Flores, C., & Canchucaya, J. (2017). Elaboración de tableros OSB con residuos de la industria del laminado y dos tipos de adhesivos. *Revista forestal del Perú*, 26-36.
- Gómez, E. (2019). *Determinación de propiedades físico y mecánicas de tableros contrachapados*. Pucallpa: Universidad Nacional de Ucayali.
- Jones, B. (2015). *Building with Straw Bale House*. Columbia: Green Books.
- Kaiser, A. (2019). *Construcción actual en madera*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Lopez, L. E. (2018). Análisis y evolución de los sistemas constructivos prefabricados, impacto ambiental e interacción con el sistema constructivo tradicional mexicano. *Anales de Edificación*, 4, 44-51.
- López, R., & Mesías, J. (2020). *Elaboración y caracterización de tableros de partículas a partir del cuesco de la palma africana con adhesivos biodegradable*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- LP Argentina. (2022, Febrero 25). *LPA Argentina*. Retrieved from LpArgentina: <https://lpargentina.com.ar/>
- LP Building Solutions. (2019). Tableros OSB certificados APA. *Catálogo técnico*.
- MAGAP. (2017). *Sistema de información pública agropecuaria. Boletín Situacional. Trigo, Ecuador*. Quito: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Martín, H. (2021). *Comparativa de cálculo estructural entre dos software: ETABS y SAP2000*. Valladolid: Universidad de Valladolid.

- Mendoza, J., & Vanga, M. (2020). Realidad y expectativas sobre la construcción sostenible en Ecuador. *San Gregorio*, 197-209.
- Minke, G., & Krick. (2018). *Manual de construcción con fardos de paja*. Fin de Siglo.
- Montaño, J., berwart, S., & Santa Mária, H. (2021). *Manual de diseño de estructuras en madera*. Santiago: Centro UC de innovación en Maderas.
- NEC-Cargas no Sísmicas. (2015). *Cargas no Sísmicas*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- NEC-Estructuras de Madera. (2015). *Estructuras de Madera*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- NEC-Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. (2015). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Ordoñez, P., & Yessenia, L. (2016). *Estructuras de madera aplicadas al sector de construcción en el Perú*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Pachala, J., & Rosero, H. (2016). *Sistema constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes*. Quito: Universidad central del Ecuador.
- Pacini, J. (2018). *Estructuras de madera Diseño, Calculo y Construcción*. Buenos Aires : diseño.
- Paredes, L., & Bocanegra, C. (2018). *Influencia de la forma y tipos de maderas sobre la humedad, densidad, compresión y flexión aplicadas a la construcción de viviendas, Trujillo 2018*. Trujillo: Universidad privada del Norte.
- Parra, R. (2017). *Comportamiento de unión Muro-Losa en aplicación de madera contra laminada de pino radiata*. Concepcion: Universidad del Bio-Bio.
- Patiño, P. (2014). *Análisis estructural de diafragmas de madera*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Pedrero, L. (2018). *Nuevas tecnologías que junto al apoyo estatal impulsan la construcción con madera en Chile*. Santiago: Universidad Mayor.

- Ponce, V. (2017). *Análisis de eficiencia energética de muro con fardo de paja y revoque de tierra cruda*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Pontón, O. (2021). *El criterio de un ingeniero frente a los programas de análisis estructural, simulación contra realidad*. Universidad Autónoma del estado de México.
- Quintana, J. (2018). *Sistemas Constructivos Sustentables en Madera y Tierra*. Santiago: Universidad Mayor.
- Rademacher, F. (2006). *Análisis de vulnerabilidad estructural de muros en base a paneles de madera, reforzada con placa OSB, frente a cargas horizontales en su plano*. Valdivia: Universidad Austral Chile.
- Revilla, J. (2021). Modelos alométricos de biomasa de árboles de *Guazuma crinita* Mart en plantaciones forestales de Uyacali Perú. *Scientia Agropecuaria*, 579-587.
- Rivera, C. (2018). *Análisis técnico del uso de los paneles SIP en construcción de viviendas unifamiliar*. Concepción: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Rivera, J. (2014). *Variación del contenido de humedad y cambio dimensional en diferentes alturas de fuste de bolaina blanca de la zona Tingo María*. Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Ruíz, J. (2019). *Estudio de características dendrológicas-anatómicas y propiedades físicas de dos especies forestales Bolaina negra y Auca atadizo en la región de San Martín*. Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín.
- Torres, P. (2017). *Determinación de las constantes Elásticas en paneles OSB mediante métodos no destructivos*. Concepción: Universidad del Bío-Bío.
- Vargas, A. (2020). *Análisis descriptivo del comportamiento de la madera para resistir al fuego y los procedimientos conexos para su protección eficiente ante la inflamabilidad*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

- Vasq ez, L., Campos, R., & Elgueta, P. (2019). *Caracterización mecánica de muros estructurales de madera de pino Radiata sometidos a carga Horizontal*. Santiago: Instituto Forestal.
- Vásquez, L., & Elgueta, P. (2017). *Determinación de las propiedades Físicas y Mecánicas de tableros OSB fabricados en Chile*. Santiago: Instituto Forestal.
- Viera. (2020). Factibilidad de construcción de viviendas sismo resistente en la zona andina del Ecuador utilizando fardos de paja. *Construcción*, 7-12.
- Viera. (2022). *Estudio de vibración ambiental de una casa hecha con fardos de paja en la región Andina de Ecuador*. Quito.
- Viera, P., Aguirre, D., & Monzó, J. (2020). Determinación de las características del pardo de paja de trigo como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción. 27(3).
- Vivanco, C. (2018). *Análisis del techo de una estructura como diafragma rígido, en el analisis de edificios segun norma E030 y su alcance estructural*. Lima: Universidad Privada del Norte.
- Zúniga, C. (2010). *Análisis Comparativo entre el revestimiento del sistema EIFS con revestimeinto de tableros OSB*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.