

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Profesor Patrocinante:** Alexander Opazo Vega, Mg.

## **“DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS EN PANELES OSB MEDIANTE MÉTODO NO DESTRUCTIVO”**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**PAULINA ANDREA TORRES AVENDAÑO**

CONCEPCIÓN, MAYO 2017

*Esta memoria de título está dedicada  
a Joaquín, mi mayor bendición.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a Dios por darme la oportunidad de estudiar, entregándome siempre las herramientas necesarias para cumplir cada una de mis metas propuestas en la vida.

Gracias infinitas a mi hijo Joaquín, quién con mucha alegría y paciencia ha sabido acompañarme en estos últimos 4 años universitarios, sabiendo comprender mi ausencia y entregándome siempre las ganas para seguir, aún en los momentos más difíciles.

A mi familia, mamá y papá, quienes han dado todo para entregarme la posibilidad de ser una profesional, entregándome su amor y apoyo incondicional, convirtiéndose en mi mayor motivación para superarme cada día. Quienes me han enseñado a valorar la vida y que con esfuerzo todo se puede lograr.

A mis familiares, tías y tíos, abuelas, primos y primas, mi gran familia que de alguna u otra manera hicieron más fáciles estos 6 años de estudio, siempre preocupados por mi desempeño y alentándome a luchar por mis sueños.

Gracias a mis amigos, a los de siempre, Nicolle y Álvaro, quienes han sido parte de mi vida desde pequeños y aún siguen a mi lado, entregándome risas, cariño y apoyo ilimitado, a quienes agradezco profundamente por tan linda amistad. A mis amigos de universidad, Javiera, Danitza, Javiera C., Ariel y Diego, con quienes en poco tiempo hemos formado lindos lazos de amistad, guardando en la memoria y en el corazón recuerdos llenos de felicidad, con quienes compartí conocimientos y largos días de estudio. A Álvaro L., quién por mucho tiempo fue mi apoyo y compañía, entregándome su más sincero amor y con quien guardo recuerdos imborrables, gracias por tanto. A mi amigo Alan, quién se ha vuelto un fiel compañero, entregándome siempre su cariño y apoyo, quién me ha proporcionado conocimientos y ayuda fundamental para el desarrollo de mi tesis, del cual estoy muy agradecida.

A mi profesor guía, don Alexander Opazo, quién me orientó en esta investigación, le agradezco por su tiempo, ayuda y por las oportunidades que me ha entregado durante mi vida universitaria. A mi querida universidad, a todos mis profesores del departamento y a sus funcionarios, quienes me ayudaron y entregaron los conocimientos necesarios para ahora desempeñarme como una Ingeniera Civil.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 Identificación y justificación del problema .....	3
1.2 Objetivos de la investigación .....	4
1.2.1 Objetivo general .....	4
1.2.2 Objetivos específicos .....	4
1.3 Metodología de trabajo .....	5
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 La madera en Chile .....	7
2.2 Paneles de virutas orientadas.....	8
2.3 Constantes elásticas .....	9
2.3.1 Módulo de Elasticidad .....	10
2.3.2 Módulo de Corte.....	10
2.4 Método de vibración de placas ortotrópicas para obtención de constantes elásticas .....	11
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
3.1 Materiales .....	14
3.2 Variables a evaluar.....	16
3.3 Metodología de ensayo .....	17
3.3.1 Ensayo de vibraciones para placas ortotrópicas .....	17
<b>4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
4.1 Obtención de parámetros.....	23
4.2 Obtención de constantes elásticas.....	25
4.2.1 Módulos de elasticidad .....	25
4.2.2 Módulo de Corte.....	29
4.3 Análisis estadístico .....	30
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>33</b>
5.1 Conclusiones.....	33
5.2 Recomendaciones .....	34
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de trabajo.....	5
Figura 2. Tipos de paneles comerciales .....	8
Figura 3. (a) Panel OSB Estructural; (b) Panel Smart Side .....	14
Figura 4. (a) Dimensiones comerciales de paneles OSB; (b) Dimensiones de probetas a ensayar .....	15
Figura 5. Montaje para realización de ensayos.....	17
Figura 6. Dimensiones y posicionamiento de elementos soportantes del panel OSB .....	18
Figura 7. Ejes de referencia y configuración de puntos a ensayar.....	19
Figura 8. Equipos para la adquisición de datos. (a) Acelerómetro; (b) Martillo Modal; (c) Sistema de adquisición de datos .....	20
Figura 9. Función de respuesta de frecuencia .....	21
Figura 10. Modos de vibrar asociados a las constantes elásticas en estudio (Larsson, 1997) .....	22
Figura 11. Obtención de los peaks de frecuencia .....	23
Figura 12. Modos de vibrar obtenidos con los peaks de frecuencia. (a) Modo (2,0); (b) Modo (0,2); (c) Modo (1,1) .....	24
Figura 13. Módulos de Elasticidad en función del espesor y tipo de panel .....	26
Figura 14. Comparación del módulo de elasticidad $E_x$ con respecto a otros autores.....	27
Figura 15. Comparación del módulo de elasticidad $E_y$ con respecto a otros autores.....	28
Figura 16. Módulos de Corte en función del tipo de panel .....	29
Figura 17. Comparación del Módulo de Corte con respecto a otros autores .....	30

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz del diseño del experimento .....	16
Tabla 2. Resumen de parámetros necesarios para la obtención de las constantes elásticas .....	25
Tabla 3. Resultados de la prueba t de dos muestras para cada constante elástica .....	31

## **DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS EN PANELES OSB MEDIANTE MÉTODO NO DESTRUCTIVO**

**Autor: Paulina Andrea Torres Avendaño**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: ptorresa@alumnos.ubiobio.cl

**Profesor Patrocinante: Alexander Opazo Vega, Mg.**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: aopazove@ubiobio.cl

### **RESUMEN**

El uso de la madera como material constructivo ha estado en creciente aumento a nivel mundial y nacional, lo que ha permitido el desarrollo y estudio de materiales derivados de la madera tales como los paneles de virutas orientadas (OSB). Este material posee propiedades mecánicas atractivas para las aplicaciones en construcción además de ser un material amigable con el medio ambiente. La principal desventaja para la utilización de estos paneles como material constructivo, es el desconocimiento de las propiedades mecánicas que posee y como varían dependiendo de las características del panel.

En esta investigación se determinan las constantes elásticas de paneles OSB de distinta tipología mediante un método no destructivo, a través de la vibración del panel y un posterior análisis modal. Para ello se ensayan un total de 36 muestras, en espesores de 9.5 mm y 11.1 mm y en tipos de paneles Smart Side y OSB estructural. Se utiliza un análisis estadístico para conocer la influencia del espesor y el tipo de panel sobre la obtención del módulo de corte y módulos de elasticidad en dichos paneles.

Los resultados muestran que el espesor del panel es una variable significativa al obtener el módulo de elasticidad normal a la fibra y el módulo de corte, no así para el módulo de elasticidad paralelo a la fibra. Por otra parte, al analizar la influencia del tipo de panel, se determinó que éste no es significativo en la evaluación de las constantes elásticas en estudio.

Palabras claves: Paneles de virutas orientadas (OSB), Método no destructivo, Constantes elásticas.

7903 Palabras Texto + 19 Figuras/Tablas\*250 + 1 Figuras/Tablas\*500 = 13153 Palabras totales.

## **DETERMINATION OF ELASTIC CONSTANTS OF OSB PANELS THROUGH NON-DESTRUCTIVE METHOD**

**Author: Paulina Andrea Torres Avendaño**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío  
ptorresa@alumnos.ubiobio.cl

**Sponsoring Teacher: Civil Engineering Alexander Opazo, MSc.**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío-Bío  
aopazove@ubiobio.cl

### **ABSTRACT**

The use of wood as a building material has been increasing worldwide and nationally, which has allowed the development and study of materials derived from wood such as oriented strand board (OSB). This material has attractive mechanical properties for applications in construction besides being environmentally friendly material. The main disadvantage of use of these panels as a building material is the lack of knowledge of the mechanical properties and how they vary depending on the characteristics of the panel.

In this research the elastic constants of OSB panels of different typology are determined by a non-destructive method, through the panel vibration and a later modal analysis. For this, a total of 36 samples are tested, at thicknesses of 9.5 mm and 11.1 mm and in types of Smart Side panels and structural OSB. A statistical analysis is used to know the influence of the thickness and the type of panel on the obtaining of the shear modulus and modulus of elasticity in these panels.

The results show that the thickness of the panel is a significant variable when obtaining the modulus of normal elasticity to the fiber and the shear modulus, but not for the modulus of elasticity parallel to the fiber. On the other hand, when analyzing the influence of the panel type, it was determined that this is not significant in the evaluation of the elastic constants under study.

Keywords: Oriented strand board (OSB), Non-destructive method, Elastic constants.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Identificación y justificación del problema

Bajo el marco de la construcción sustentable, tanto en Chile como a nivel mundial, se ha ido incrementando en los últimos años la construcción en base a madera, puesto a que es un recurso natural y renovable, lo que la hace ser el material más ecológico que existe para la construcción. Sin embargo en Chile, el uso de la madera se ve limitado a la construcción de viviendas sociales y no a edificaciones de gran envergadura, debido a las restricciones normativas vigentes.

Dentro de los productos derivados de la madera se encuentran los tableros de virutas orientadas (OSB), los que están formados por hojuelas de madera orientadas en tres capas perpendiculares entre sí, mezcladas con adhesivos prensados a alta temperatura y presión. Estos tableros son utilizados para rigidizar estructuras de techos, muros y pisos en la construcción de viviendas y edificios.

Algunas propiedades relevantes para aplicaciones en el ámbito del diseño y construcción en madera son el módulo de elasticidad, el cual representa la resistencia a la deformación al aplicar una fuerza. Por otra parte, se encuentra el módulo de corte, que representa cuánta deformación puede tener un material al ser sometido a esfuerzos cortantes. Estas propiedades mecánicas son fundamentales para conocer y estudiar el comportamiento de una estructura bajo distintas sollicitaciones, lo que resulta esencial para asegurar que los procedimientos de construcción sean eficientes. De manera convencional, la determinación de estas propiedades mecánicas de los derivados de la madera se realiza actualmente utilizando técnicas complejas del tipo destructivas, lo que demanda tiempo y material que no podrá ser utilizado después de ser ensayado. Este tipo de ensayos, además son del tipo no representativos, ya que se utiliza solo una muestra del material a ensayar y no la pieza completa.

En la actualidad se han desarrollado varias técnicas alternativas para la determinación de las propiedades mecánicas de materiales isotrópicos y ortotrópico, las que analizan la respuesta dinámica de los materiales. Su naturaleza no destructiva y económica, la simplicidad, la precisión de los resultados proporcionados y la facilidad de implementación lo hacen muy atractivo para la investigación. En estas técnicas, la respuesta de un modelo numérico de la muestra se correlaciona con las observaciones experimentales de su comportamiento estructural real.

El método de vibración de placas es un método que analiza la respuesta dinámica del material para luego conocer sus propiedades mecánicas. La aplicabilidad de este método depende del conocimiento de las ecuaciones de ondas para placas ortotrópicas, que relacionan las frecuencias naturales y la densidad de una muestra con las propiedades dinámicas que presenta.

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación busca estudiar las constantes elásticas de los paneles OSB mediante un método dinámico no destructivo, con el fin de determinar si existe una relación directa entre el espesor y tipo del panel en la magnitud de estas propiedades mecánicas.

## **1.2 Objetivos de la investigación**

### *1.2.1 Objetivo general*

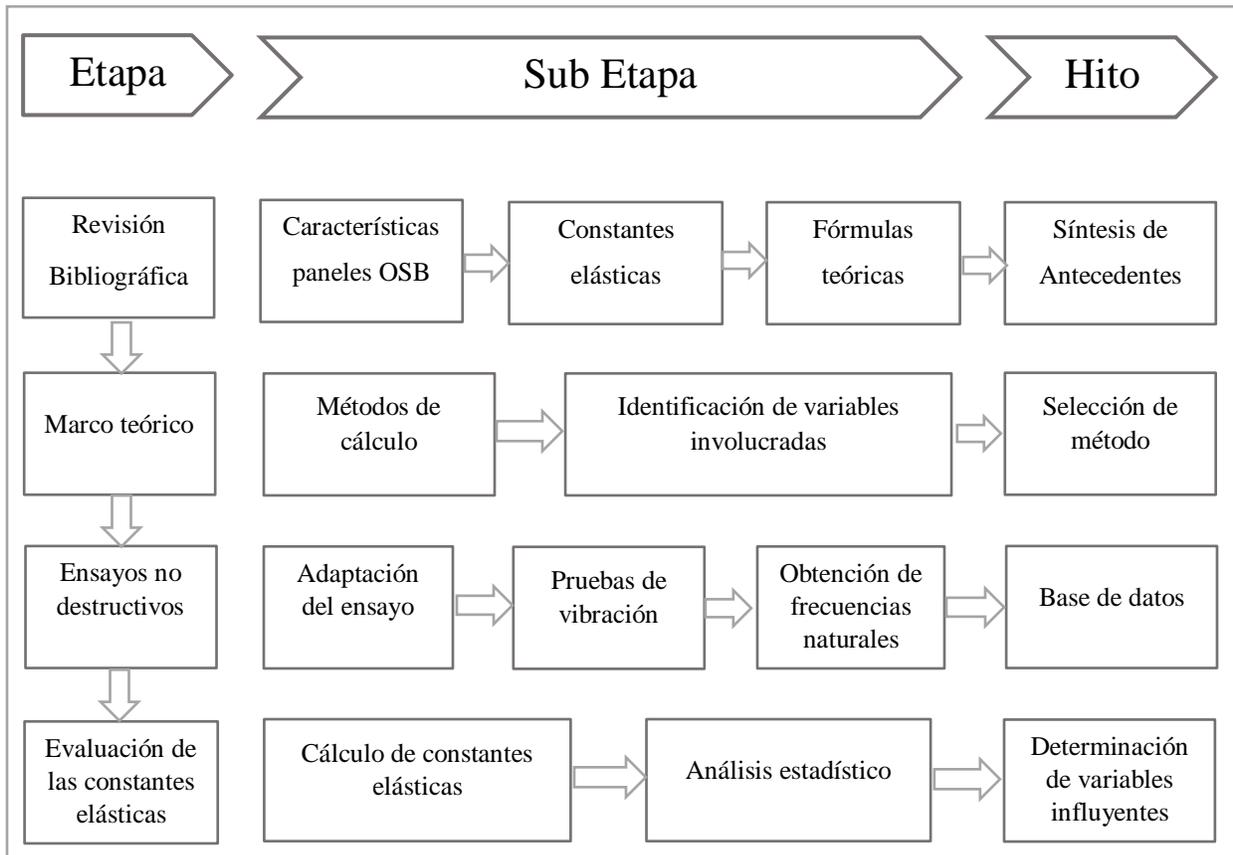
- Determinar las constantes elásticas en paneles OSB mediante un método no destructivo.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

- Sintetizar el estado del arte respecto del análisis no destructivo de paneles OSB, detectando variables claves en la obtención de las constantes elásticas en estos materiales.
- Estudiar y adaptar técnica no destructiva de evaluación de constantes elásticas a través de vibración del panel y análisis modal experimental.
- Obtener módulo de elasticidad y de corte de paneles OSB mediante ensayos de análisis modal experimental para dos tipos de panel y dos espesores.
- Determinar la influencia del espesor y tipo de panel en la obtención de las constantes elásticas estudiadas.

### 1.3 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se estructura en 4 etapas, tal como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Metodología de trabajo**

A continuación, se describen brevemente cada una de las etapas mostradas en la metodología de trabajo:

- i. **Revisión bibliográfica:** Esta etapa consiste en un estudio de antecedentes asociado a la medición de propiedades mecánicas en derivados de la madera. Se realiza una revisión de publicaciones existentes sobre las técnicas destructivas y no destructivas para la evaluación de las constantes elásticas en paneles OSB, con el fin de sintetizar el estado del arte y así obtener una base teórica adecuada.

- ii. Marco conceptual: En esta etapa se estudian los métodos no destructivos y se identifican las variables necesarias para el cálculo de las constantes elásticas en estudio. Quedando definida finalmente la metodología con mayor facilidad de adaptación, con respecto a las condiciones disponibles.
- iii. Ensayos dinámicos: Se definen las variables de interés, identificando los tipos de paneles a ensayar. Esta etapa incluye la medición de las vibraciones de los paneles para conocer sus frecuencias naturales y modos de vibrar, como también las dimensiones y masas de cada panel. Finalmente se obtiene una base de datos con toda la información necesaria para la evaluación de las constantes elásticas mencionadas.
- iv. Evaluación de las constantes elásticas: Finalmente en esta etapa se realiza el cálculo de las constantes elásticas para cada panel y se comparan los resultados en función de los espesores y tipo de panel. De esta manera se puede determinar si existe una relación entre estas variables y el valor de las constantes elásticas en estudio.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Debido a la poca información existente en el país sobre el comportamiento de viviendas y edificios de mediana altura con estructuración en madera, particularmente sobre la capacidad de los muros estructurales, es que se han llevado a cabo estudios para determinar las propiedades mecánicas de dicho material. Estos estudios se realizan con el fin de poder definir el comportamiento de productos derivados de la madera utilizando métodos de evaluación de forma destructiva como de forma no destructiva.

En este capítulo se describen los conceptos y principios fundamentales asociados a los elementos de estudio de esta investigación, junto con dar sustento a la metodología de trabajo planteada.

### **2.1 La madera en Chile**

El uso de la madera en Chile está asociada principalmente a la construcción de viviendas sociales y no como un material de construcción de alto estándar, esto se ve reflejado ya que en nuestro país las principales edificaciones de envergadura se tienden a construir en hormigón armado en base a muros (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. ICH. 2002) y en acero. Últimamente existe la atención en promover el desarrollo de construcciones sustentables (MINVU 2012), dentro de este aspecto la madera juega un rol fundamental, debido a que, frente a otros materiales de la construcción, la madera es la que tiene menor huella ecológica y su empleo contribuye a una significativa reducción de CO<sub>2</sub> (Cabrero, 2009).

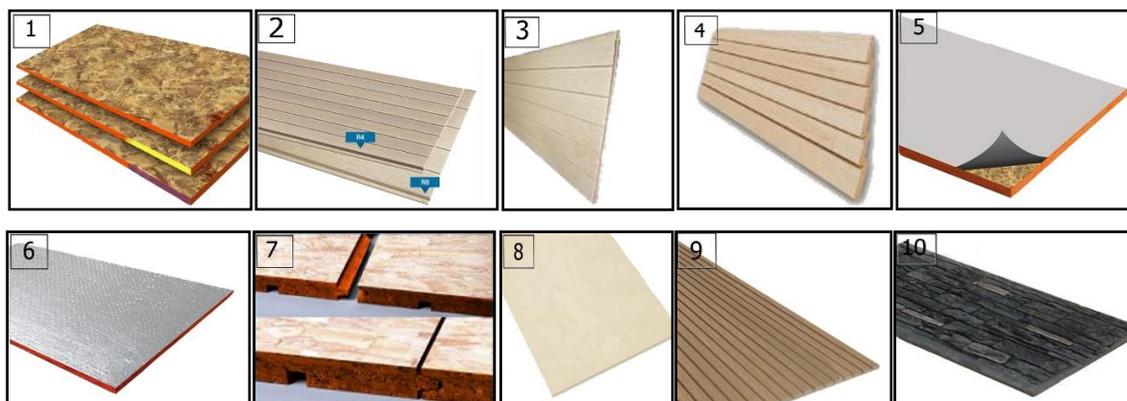
En Chile el principal recurso forestal para la comercialización es el pino radiata, el cual contribuye en un 60% (1.469.718 ha) del total de hectáreas de plantación a nivel país (INFOR 2014). Principalmente en Chile existen diferentes formas de utilizar la madera, esta se puede utilizar tanto en bruto, cepillada, aserrada como en derivados tales como conglomerados de madera (paneles de virutas orientadas, paneles de fibra de densidad media, etc.) y paneles de madera sólida (madera contralaminada, madera laminada, etc.).

## 2.2 Paneles de virutas orientadas

Los tableros de virutas orientadas (OSB) son tableros estructurales formados por hojuelas rectangulares de madera, dispuestas en 3 o 4 capas perpendicularmente unas con otras, formando laminación cruzada para no presentar debilidad estructural. Estas hojuelas son mezcladas con ceras y adhesivos para posteriormente ser sometidas a altas temperaturas y presiones.

Estos paneles son utilizados en la construcción de techumbres, muros y pisos. Las notables características de este material lo han hecho uno de los más utilizados dentro de los productos derivados de la madera para uso estructural.

Dentro de los paneles OSB existe una amplia gama de estos productos, donde varían dependiendo de su uso estructural o revestimiento; de uso exterior o interior; características estéticas; entre otras distinciones. En la Figura 2 se muestran los principales tipos de paneles que existen en el mercado nacional.



**Figura 2. Tipos de paneles comerciales**

Fuente: LP Building Products, 2016.

Como se muestra en la Figura 2, existen variadas tipologías en paneles OSB, dentro de los que se pueden encontrar:

- (1) OSB Estructural, un tablero estructural certificado, dentro del cual también se encuentra una tipología con protección anti termitas y un panel con sistema anti termitas y anti hongos.
- (2) Smart Side, un panel estructural y de revestimiento exterior, con textura de cedro y diseño sobre relieve, el cual se encuentra con ranurado vertical cada 100 mm y cada 200 mm.

- (3) Smart Panel H, un tablero de revestimiento estructural con ranurados horizontales cada 200mm.
- (4) Smart Lap, el cual es un tinglado de alta durabilidad el cual sirve para revestir la estructura.
- (5) OSB H Wrap, un tablero estructural con barrera hidrófuga que aporta protección contra la lluvia y libera la humedad interior, diseñada para aplicación de muros.
- (6) Tech Shield, un tablero estructural con barrera radiante, aplicable para muros y techos que ayudan a reducir la temperatura al interior de la estructura.
- (7) Top Notch, un panel estructural machihembrado especial para pisos, el cual mejora la unión entre tableros y rigidiza la estructura.
- (8) Estuco Panel, un tablero estructural protegido, con aplicación en muros exteriores e interiores, el cual incorpora en una de sus caras un papel de superficie lisa para proteger el tablero de la humedad y agua.
- (9) Panel Colonial, un panel ranurado fino cada 50 mm el cual sirve de revestimiento no estructural para interior y exterior.
- (10) Stone Cladding, el cual es un panel de revestimiento tipo piedra, diseñado para dar realce y elegancia a muros interiores y exteriores con un nuevo estándar para cubrir muros.

### **2.3 Constantes elásticas**

En el mundo existe una infinidad de materiales, muchos de los cuales son usados en propósitos de ingeniería. Cada uno posee propiedades mecánicas intrínsecas del material, lo que se ve reflejado en que cada uno tiene distintas capacidades de elasticidad, dureza, resistencia a la deformación, entre otras propiedades. La relación entre la fuerza capaz de soportar un material y la deformación asociada a esa fuerza en las distintas direcciones de análisis, son las llamadas constantes elásticas.

Los materiales en gran parte presentan propiedades mecánicas iguales en todas las direcciones, los cuales son denominados materiales isotrópicos. Por otro lado, existen materiales en los cuales las propiedades mecánicas varían según la dirección de análisis, estos materiales se les designa como anisotrópicos. Cuando las propiedades del material son únicas e independientes en tres direcciones perpendiculares entre sí, se trata de un material ortotrópico. En particular para el caso de la madera, las constantes elásticas son consideradas como para un material ortotrópico, ya que se idealiza el sólido haciendo coincidir cada dirección ortogonal con un plano de la madera (radial, longitudinal y tangencial).

### 2.3.1 *Módulo de Elasticidad*

El módulo de elasticidad de un elemento estructural es una medida de resistencia a un cambio de forma o tamaño, bajo la acción de fuerzas en esa sección. Conocer esta propiedad es fundamental en los paneles OSB, ya que permite determinar el comportamiento estructural que tendrán los elementos que contribuyen una vivienda o edificación. Un valor bajo del módulo de elasticidad implicará un mayor grado de deformación, punto importante para conocer el comportamiento estructural de un material.

Existe distintas metodologías para determinar el módulo de elasticidad de un material, en ellas se distinguen los métodos estáticos y los métodos dinámicos. Para la obtención de esta constante elástica mediante métodos estáticos, existen técnicas estandarizadas (ASTM D3043) las cuales fueron ocupadas por diferentes autores (Biblis 1989; Pu et al 1992; Wang et al 2003; Grandmont 2006; Zhou and Chui 2015) para la obtención del módulo de elasticidad para materiales en base a madera. Por otro lado, diversos autores estudiaron el comportamiento dinámico (Martines 2006; Zhou and Chui 2015; Guan et al 2015) para la obtención del módulo de elasticidad para productos derivados de la madera.

### 2.3.2 *Módulo de Corte*

El módulo de corte de un elemento de madera es una propiedad que caracteriza cuánta deformación puede tener un cuerpo al someterlo a esfuerzos cortantes. Es importante conocer esta propiedad, ya que permite definir el comportamiento de una estructura además de verificar desplazamientos en el plano.

La obtención del módulo de corte se puede realizar mediante métodos estáticos que están normados (ASTM D3044) que han sido utilizados por diferentes autores (Grandmont 2006; Zhou and Chui 2015), o mediante ensayos dinámicos (Nakao y Okano 1987; Zhou and Chui 2015). Estos métodos se han tratado de validar, pero faltan pruebas que permitan la realización confiable para obtener el módulo de corte con estas técnicas.

En la actualidad se desconoce esta propiedad mecánica de los productos derivados de la madera, lo que se debe en gran medida al alto costo económico y de tiempo que requiere realizar este tipo de ensayos.

## 2.4 Método de vibración de placas ortotrópicas para obtención de constantes elásticas

Este método de ensayo no destructivo está diseñado para determinar las constantes elásticas, tales como Módulo de Corte y Módulos de Elasticidad en el plano, en placas ortotrópicas en base a madera, mediante un análisis modal experimental propuesto por Zhou and Chui (2015). Estos ensayos se desarrollaron en paneles OSB y paneles MDF, comparando los resultados obtenidos mediante ensayos estáticos y dinámicos.

Los estudios realizados sobre el método de vibración de placas rectangulares destacan la condición de borde como una variable relevante a considerar, donde se encuentran: todos los lados completamente libres (FFFF), un par de lados opuestos libres y el otro par simplemente apoyados (SFSF) y un lado simplemente apoyado y los otros tres libres (SFFF).

La condición de borde con todos los lados del panel completamente libres (FFFF) consiste en hacer vibrar el panel para registrar las señales de tiempo de impacto y de aceleración para identificar los modos de vibrar de cada panel. Luego, se realiza un análisis de sensibilidad, con lo que se determina que, para la condición de bordes libres, los modos de vibrar sensibles a  $E_x$ ,  $E_y$  y  $G_{xy}$  son los modos (2,0), (0,2) y (1,1) respectivamente.

Al ser identificado el modo de vibrar asociado a cada constante elástica en estudio, se obtiene la frecuencia fundamental de cada modo para realizar el cálculo de las constantes elásticas. Para esta obtención se utilizó la solución de frecuencia de Rayleigh de un término (Sobue y Kitazumi 1991, Bos y Casagrande 2003), la que relaciona la frecuencia natural asociada al modo de vibrar con los coeficientes característicos de las condiciones de borde.

De esta manera, para encontrar el módulo de elasticidad tanto paralelo como perpendicular a la fibra, para la condición de borde con todos los lados libres del panel (FFFF) algunos autores (Nakao y Okano 1987; Bos y Casagrande 2003), definieron en la ecuación 1 y 2, expresiones matemáticas que permiten el cálculo de estas constantes.

$$E_x = \frac{48\pi^2 \rho a^4 f_{(2,0)}^2 (1 - \nu_{xy} \nu_{yx})}{500.6 h^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$E_y = \frac{48\pi^2 \rho b^4 f_{(0,2)}^2 (1 - \nu_{xy} \nu_{yx})}{500.6 h^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- $E_x$  : Módulo de Elasticidad paralelo a la fibra (MPa).  
 $E_y$  : Módulo de Elasticidad perpendicular a la fibra (MPa).  
 $\rho$  : densidad del panel rectangular (kg/m<sup>3</sup>).  
 $a$  : longitud del panel (mm).  
 $b$  : ancho del panel (mm).  
 $f_{(2,0)}$  : frecuencia fundamental asociada al modo de vibrar (2,0).  
 $f_{(0,2)}$  : frecuencia fundamental asociada al modo de vibrar (0,2).  
 $\nu_{xy}$  : módulo de Poisson en el plano  $x$  y en dirección  $y$ .  
 $\nu_{yx}$  : módulo de Poisson en el plano  $y$  y en dirección  $x$ .  
 $h$  : espesor del panel (mm).

Donde  $(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})$  es de 0.99 para la mayoría de los materiales de madera.

Por otro lado, el módulo de corte se puede obtener reemplazando la frecuencia asociado al modo de vibrar (1,1) y parámetros de dimensiones, como se muestra en la Ecuación 3.

$$G_{xy} = 0.9\rho \left( \frac{ab}{h} f_{(1,1)} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- $G_{xy}$  : Módulo de Corte (MPa).  
 $f_{(1,1)}$  : Frecuencia fundamental del modo de vibrar (1,1)

Las ecuaciones de la condición de borde SFFF, fueron establecidas por los autores Sobue and Katoh (1992). Estas expresiones matemáticas para encontrar las distintas constantes elásticas se

pueden encontrar en el Anexo A. Con respecto a las ecuaciones asociadas a la condición de borde SFSE, las constantes elásticas son obtenidas mediante un método iterativo que permite la obtención de las constantes elásticas el cual fue propuesto por Kim y Dickinson (1985)

Los autores Zhou and Chui (2015) intentaron encontrar las brechas entre los métodos estáticos y dinámicos, estableciendo que en la condición más desfavorable existen diferencias de hasta un 42% entre ambos métodos.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

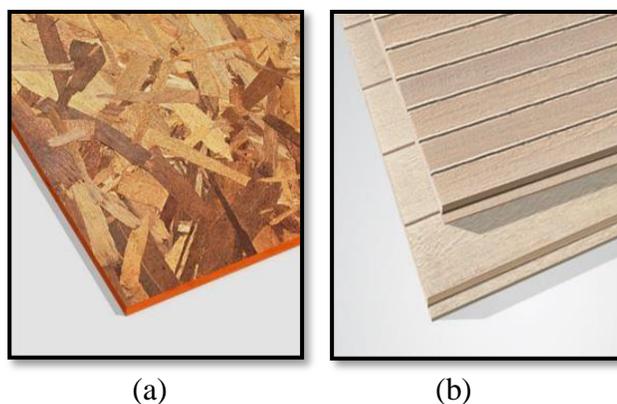
En este capítulo se presentan los materiales y métodos utilizados que permiten la realización de los ensayos de vibración de paneles OSB. En primera instancia, se muestran los materiales necesarios para realizar todas las pruebas de vibración. Luego se propone el método de ensayo no destructivo en base a vibraciones de placas ortotrópicas, que incluye la descripción de la técnica utilizada y equipos necesarios para su ejecución.

#### 3.1 Materiales

Para la realización de los ensayos de vibración que permiten encontrar las constantes elásticas de paneles OSB, se utilizan 9 paneles OSB estructurales comerciales, de diferentes tipos y espesores, los que fueron comprados en la tienda Homecenter Sodimac de Concepción, bajo el financiamiento de la Universidad del Bío-Bío. Los paneles se clasifican de la siguiente manera:

- 3 paneles de tipo Smart Side de espesor 11,1 mm y ranurado cada 200 mm, proveniente de la empresa Louisiana Pacific Chile.
- 3 paneles de tipo OSB Estructural de espesor 11,1 mm y provenientes de la empresa Kronospan SRL Rumania.
- 3 paneles de tipo OSB Estructural de espesor 9,5 mm y provenientes de la empresa Kronospan SRL Rumania.

A continuación, la Figura 3 muestra los dos tipos de paneles utilizados en esta investigación para la obtención de las constantes elásticas.

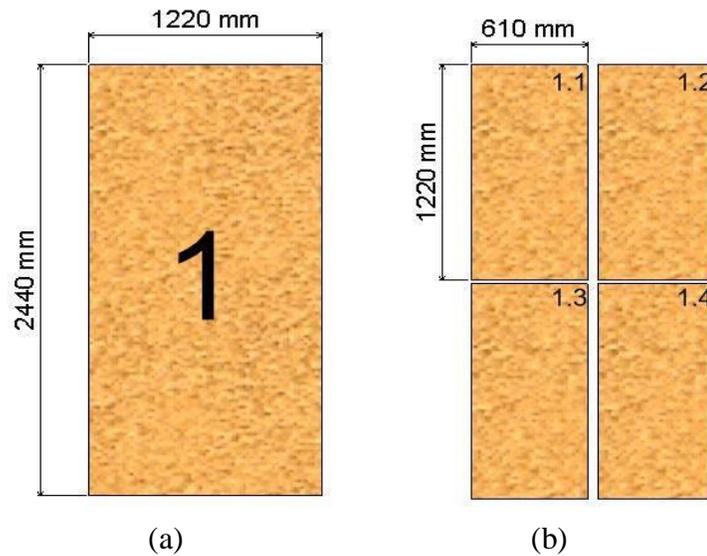


**Figura 3. (a) Panel OSB Estructural; (b) Panel Smart Side**

Fuente: LP Building Products, 2016.

En la Figura 3 (a) se muestra el panel OSB estructural, el que dentro de sus principales características destacan la gran estabilidad dimensional y alta resistencia mecánica. En la Figura 4 (b) se muestra el Panel Smart Side, el cual presenta una textura de sobre relieve que lo hace resistente a las condiciones climáticas y muestra una terminación exterior, cumpliendo la función de revestir y estructurar a la vez.

Los paneles OSB a utilizar poseen una longitud promedio de 2440 mm y un ancho promedio de 1220 mm, tal como lo muestra la Figura 4 (a). Cada panel de tamaño completo es dividido en 4 partes iguales para posteriormente ser cortado y así obtener 4 muestras por panel, de dimensiones 1220 mm de longitud y 610 mm de ancho, tal como lo muestra la Figura 5 (b).



**Figura 4. (a) Dimensiones comerciales de paneles OSB; (b) Dimensiones de probetas a ensayar**

Como se observa en la Figura 4, cada panel es cortado en 4 partes iguales, lo cual generara un total de 36 probetas a ensayar. Cada muestra es denotada de la forma (m,n), donde “m” corresponde al número del panel y “n” corresponde al número del corte realizado al panel completo. Donde el número de paneles (m) varía entre 1 y 9; y el corte realizado (n) varía entre 1 y 4.

### 3.2 Variables a evaluar

Para evaluar el efecto de las características de los paneles OSB en la obtención de las constantes elásticas en estudio, se propone realizar distintas combinaciones de las variables que más influyen en este cálculo. A continuación se definen las variables a estudiar:

- Tipo de panel: en el mercado de paneles en base a madera, se encuentran una amplia gama de productos en base a virutas orientadas, donde varían según su uso o según sus características estéticas. En esta investigación se propone evaluar las brechas existentes entre los paneles OSB Estructurales y los paneles Smart Side, ya que se desconocen las propiedades mecánicas de estos materiales.
- Espesor: en la industria de la madera se pueden encontrar principalmente 4 espesores comerciales en paneles OSB. Especialmente en la construcción se trabaja con paneles de 9.5 mm y 11.1 mm, por esta razón se evalúa el espesor en estos dos niveles.

Cabe destacar que solamente los paneles OSB Estructurales se evalúan en los dos espesores, estableciendo en la Tabla 1 los escenarios propuestos para encontrar las constantes elásticas de estos materiales.

**Tabla 1. Matriz del diseño del experimento**

ESPESOR	TIPO	
	OSB ESTRUCTURAL	SMART SIDE
9.5	X	
11.1	X	X

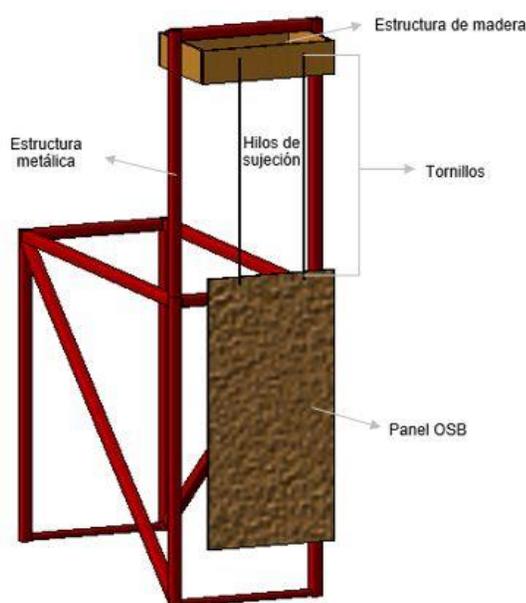
De esta manera se realizará una comparación entre los paneles OSB estructurales y paneles Smart Side de espesor 11.1 mm; y se hará una comparación entre paneles de espesor 9.5 mm y 11.1 mm de OSB estructural. Cabe destacar que el tamaño muestral para la realización de los ensayos fue definido de manera exploratoria, restringida al presupuesto disponible.

### 3.3 Metodología de ensayo

#### 3.3.1 Ensayo de vibraciones para placas ortotrópicas

Este método de ensayo se realiza en base a la metodología propuesta por Zhou and Chui (2015), donde se destaca la condición de borde como una variable relevante a considerar para detectar su aplicación práctica en términos de implementación.

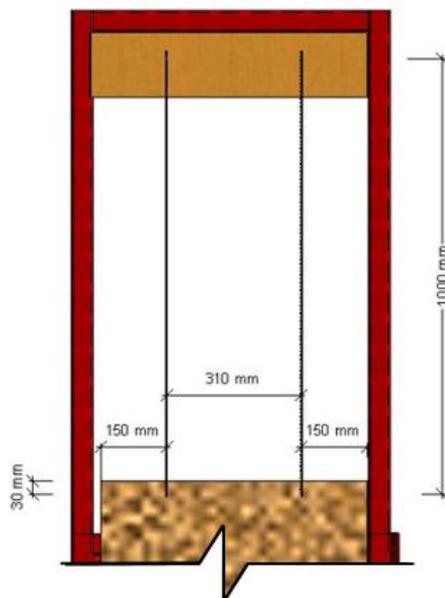
Esta investigación utiliza la condición de borde FFFF, la cual establece que el panel ortotrópico no presente restricciones de borde en ninguno de sus extremos. Para ello se adaptará en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Bío-Bío un sistema capaz de replicar dicha condición. De esta manera se debe reacondicionar una estructura soportante, tal como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5. Montaje para realización de ensayos**

Como se muestra en la Figura 5, para lograr este sistema de apoyos con bordes libres, se debe colgar el panel mediante hilos de alta resistencia a la tracción, sujetos a una estructura metálica con vigas de madera lo suficientemente resistentes para lograr soportar el panel. Esta configuración permite la vibración libre del panel sin ninguna restricción.

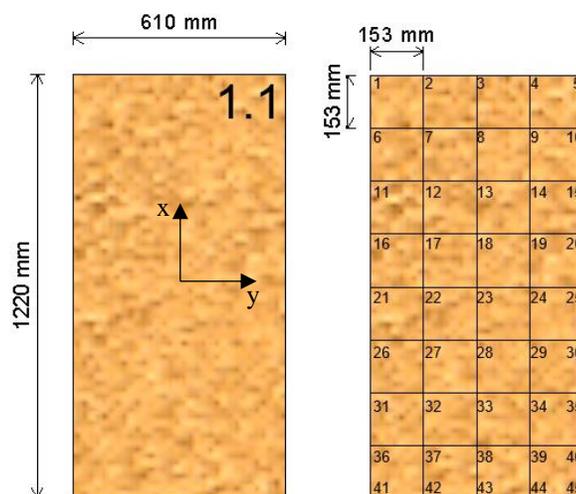
Los hilos de sujeción mostrados en la Figura 5 son sujetos mediante tornillos de 5 mm de diámetro y de 50 mm de longitud, donde su disposición en el panel y en la estructura de madera se detalla en la Figura 6.



**Figura 6. Dimensiones y posicionamiento de elementos soportantes del panel OSB**

Como se puede observar en la Figura 6, son situados dos tornillos en la estructura de madera adjunta a la estructura metálica soportante, los que están separados 310 mm entre sí. Estos tornillos son instalados tanto en la estructura soportante de madera como en el panel OSB, donde los tornillos se encuentran a 30 mm del borde superior y a 150 mm de los bordes exteriores. La función de los tornillos es unir la estructura soportante y el panel OSB mediante dos hilos de aproximadamente 1000 mm de longitud, quedando suspendido el panel y logrando así, la condición de borde anteriormente descrita y permitiendo la vibración libre del panel.

Para realizar el ensayo de vibraciones propuesto por los autores Zhou and Chui (2015) para encontrar las constantes elásticas de los paneles, es necesario establecer distintos puntos de interés en el panel, donde se registra para cada punto de ensayo, la función de respuesta de frecuencia (FRF). A continuación, en la Figura 7, se muestra la configuración adecuada propuesta por los autores para realizar el ensayo.



**Figura 7. Ejes de referencia y configuración de puntos a ensayar**

Como se puede observar en la Figura 7, en cada panel se dibuja una malla de 45 puntos en una configuración de 5 x 9, espaciados cada 150 mm aproximadamente. Esto se realiza para obtener una caracterización homogénea del panel.

Para cada muestra de panel son registradas las masas y dimensiones (espesor, largo y ancho). Estos datos se utilizan para encontrar la densidad, la cual es fundamental para determinar las constantes elásticas de los paneles bajo la técnica no destructiva en que se basa la metodología.

Una vez realizada la etapa de montaje estructural, se realizan las pruebas de vibraciones a cada muestra de panel. A continuación, se explica el procedimiento utilizado para aplicar el ensayo de técnica no destructiva.

Para el análisis de vibraciones en los paneles OSB, se procede a instalar de manera enroscada, un acelerómetro de la marca IMI SENSORS, como se muestra en la Figura 8 (a). Este dispositivo se dispuso en la esquina superior derecha del panel a ensayar, quedando inserto a 30 mm del borde superior y a 20 mm del borde lateral derecho. Este instrumento es el encargado de capturar las vibraciones generadas en el panel al realizar el análisis de vibraciones y posee las siguientes características técnicas:

- Modelo: 603C01
- Sensibilidad ( $\pm 10\%$ ):  $10.2 \text{ mV}/\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- Rango medición:  $\pm 490 \text{ m/s}^2$

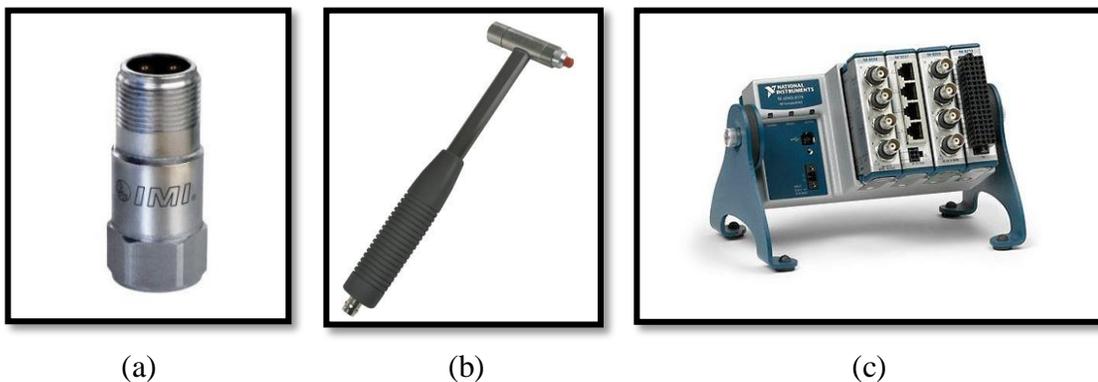
- Rango de frecuencia ( $\pm 3$  dB): 0.5 a 10000 Hz
- Frecuencia de resonancia: 25 kHz
- Resolución de banda ancha (1 a 10000 Hz):  $3434 \mu\text{m/s}^2$
- Peso: 51 g

Para realizar el impacto modal en cada uno de los puntos de la malla del panel, se utiliza un martillo modal como se muestra en la Figura 8 (b), con el fin de generar una oscilación libre del panel en sentido longitudinal al impacto. Este martillo modal es de la marca PCB PIEZOTRONICS y posee las siguientes características:

- Modelo: 086C03
- Sensibilidad ( $\pm 15\%$ ): 2.25 mV/N
- Rango de medición:  $\pm 2224$  N
- Frecuencia de resonancia:  $\geq 22$  kHz
- Masa del martillo: 0.16 kg

Para traspasar las señales obtenidas por el acelerómetro y el martillo modal, se requiere de un sistema de adquisición de datos dinámicos, el cual es conectado para sintetizar y transferir estas señales a un software computacional. Este instrumento, mostrado en la Figura 8 (c), posee las siguientes características técnicas:

- Marca: National Instruments
- Modelo: NI cDAQ-9174
- Peso: 574 g

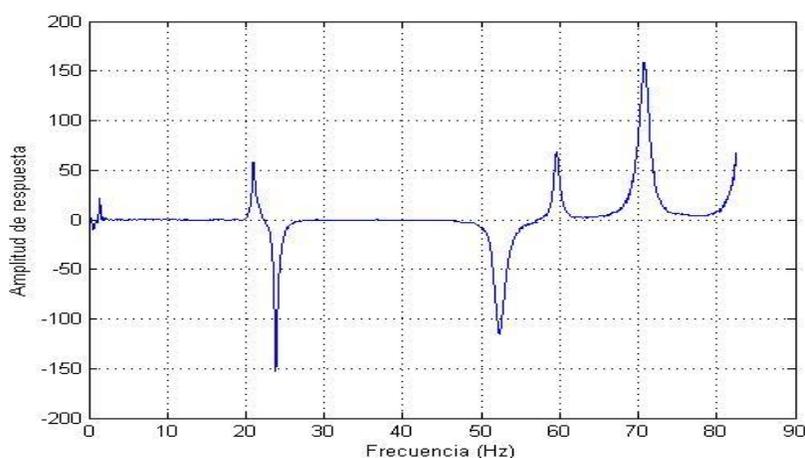


**Figura 8. Equipos para la adquisición de datos. (a) Acelerómetro; (b) Martillo Modal; (c) Sistema de adquisición de datos**

En la Figura 8 se puede ver el total de equipos necesarios para la adquisición de datos registrados en el ensayo. El procedimiento se basa en golpear cada punto de la malla del panel mediante el martillo modal, registrando la fuerza aplicada en el golpe. A la par, se registra la aceleración generada en el panel a través del acelerómetro insertado. Se procede a golpear cada punto del panel, teniendo en consideración que la medición de un punto acaba cuando la vibración del panel ha cesado por completo, dando paso para golpear el siguiente punto.

Para la obtención de los datos dinámicos registrados por el acelerómetro y martillo modal, se confeccionó una metodología en el software LabVIEW, con la finalidad de guardar estas señales. Este programa captura 20000 muestras de datos de tiempo, aceleración y fuerza para cada uno de los puntos ensayados del panel, con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz, las que fueron almacenadas en un archivo de texto.

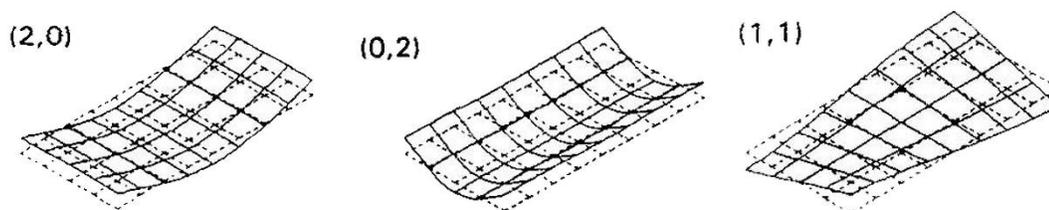
Estos datos de fuerza y aceleración en el tiempo son leídos por un código confeccionado en MATLAB, mostrado en el ANEXO B, el cual utiliza la base de datos entregada por el software LabVIEW para graficar la función de respuesta de frecuencia (FRF) para cada punto del panel. Este código entrega la gráfica de la parte imaginaria de las FRF, que se muestra en la Figura 9, donde se identifican las frecuencias fundamentales las cuales están asociadas a un determinado modo de vibrar.



**Figura 9. Función de respuesta de frecuencia**

Para identificar los modos de vibrar relacionados a las constantes elásticas en estudio, se deben obtener de forma manual cada uno de los peaks de frecuencia en la FRF para cada punto del panel.

Estos peaks tienen asociado un valor de amplitud de respuesta y un valor de frecuencia, los que son registrados y evaluados en un nuevo código en MATLAB. Este código se muestra en el ANEXO B y permite obtener la gráfica del modo de vibrar asociado al peak de frecuencia identificado en la FRF. Para obtener las constantes elásticas de interés, se requieren identificar los 3 modos de vibrar que se muestran en la Figura 10.



**Figura 10. Modos de vibrar asociados a las constantes elásticas en estudio (Larsson, 1997)**

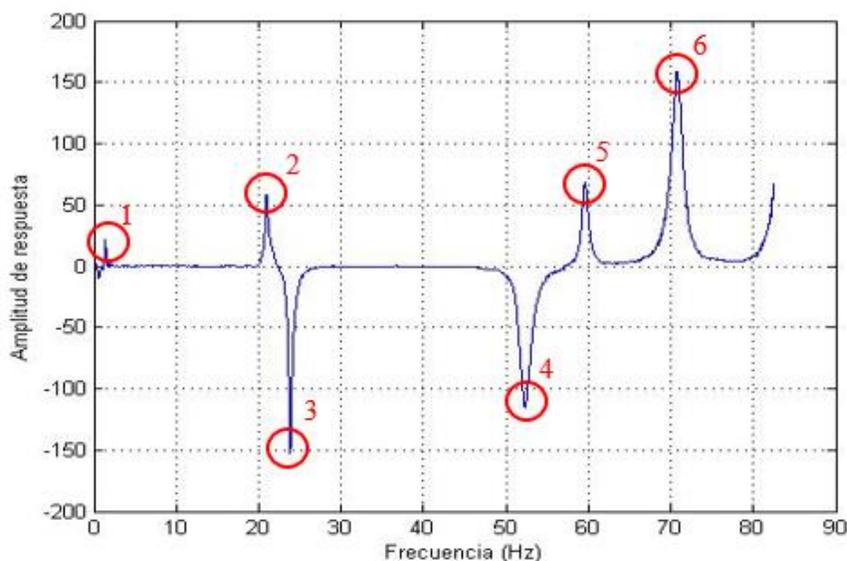
Con los modos de vibrar y la frecuencia fundamental identificada, se evalúa el módulo de elasticidad paralelo a la fibra ( $E_x$ ), módulo de elasticidad perpendicular la fibra ( $E_y$ ) y el módulo de corte ( $G_{xy}$ ) a través de las ecuaciones propuestas por Zhou and Chui (2015) descritas en el capítulo 2.4.

## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan en detalle los resultados experimentales obtenidos para los paneles OSB en estudio. En una primera etapa se muestran las propiedades mecánicas obtenidas para los distintos tipos de paneles OSB y luego, se realiza un análisis estadístico para caracterizar estos resultados.

### 4.1 Obtención de parámetros

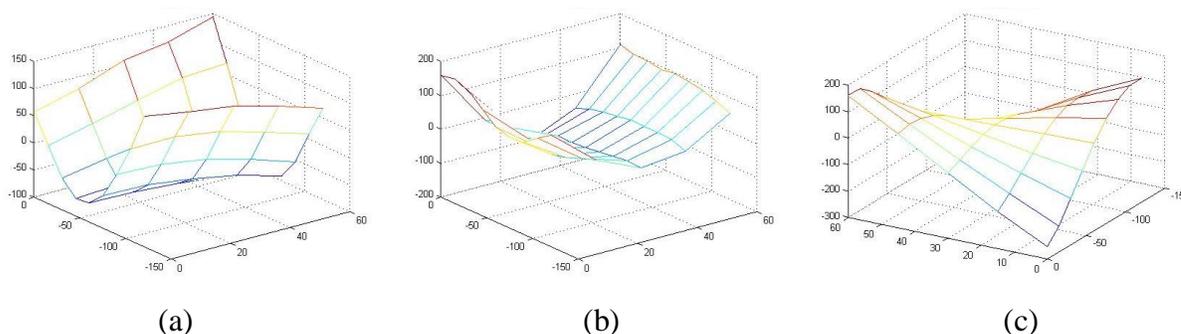
A continuación, se muestra la obtención de parámetros necesarios para el cálculo de las constantes elásticas que son de interés para esta investigación. Donde uno de los parámetros fundamentales para usar la metodología mencionada en el capítulo 3.3, es la identificación de los modos de vibrar asociadas a las constantes elásticas de paneles OSB. En la Figura 11, se muestra la función de frecuencia de respuesta de un ensayo realizado para un determinado panel.



**Figura 11. Obtención de los peaks de frecuencia**

De acuerdo a la Figura 11, se obtuvieron 6 peaks de frecuencias para cada punto del panel, donde cada peak está asociado a un determinado modo de vibrar. Para identificar los modos de vibrar de

interés, es necesario visualizar el comportamiento de cada punto, lo que se realiza mediante una rutina en MATLAB. A continuación, en la Figura 12, se muestran los modos de vibrar obtenidos mediante el análisis mencionado, los cuales son de interés para el cálculo de las constantes elásticas en estudio.



**Figura 12. Modos de vibrar obtenidos con los peaks de frecuencia. (a) Modo (2,0); (b) Modo (0,2); (c) Modo (1,1)**

Conforme a lo mostrado en la Figura 12, se definen 3 modos de vibrar que son de interés, donde la Figura 12 (a) está asociada al modo (2,0) el cual se obtiene al graficar la frecuencia fundamental del punto 2 (véase en Figura 11), este valor es necesario para la obtención del módulo de elasticidad paralelo a la fibra ( $E_x$ ). Por otro lado, en la Figura 12 (b) se muestra el modo de vibrar (0,2) el cual se logra identificar graficando la frecuencia fundamental del punto 6 (véase en Figura 11). Este valor es requerido para calcular el módulo de elasticidad perpendicular a la fibra ( $E_y$ ). Finalmente, en la Figura 12 (c) se puede observar el modo de vibrar (1,1) el cual fue el resultado de graficar la frecuencia fundamental del punto 3 (véase en Figura 11), este valor es necesario para obtener el módulo de corte ( $G_{xy}$ ) en paneles OSB.

Para aplicar la metodología propuesta, fue necesario determinar distintas propiedades geométricas de cada panel, tales como, largo, ancho y espesor; así como también, fue necesario obtener la densidad de cada probeta a ensayar. A continuación, en la Tabla 2 se muestra un resumen de los parámetros elementales para la obtención de las constantes elásticas, cada valor corresponde a un promedio de 4 ensayos realizados por panel. El detalle de todos los ensayos realizados se encuentra en el ANEXO C.

**Tabla 2. Resumen de parámetros necesarios para la obtención de las constantes elásticas**

Panel	Espesor (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	f (2,0) (Hz)	f (0,2) (Hz)	f (1,1) (Hz)
SS 1	11.41	637.8	20.61	66.8	22.68
SS 2	11.09	650.3	19.45	66.74	21.13
SS 3	11.18	659.6	19.8	65.47	21.3
OSB11 1	10.96	607.5	20.56	62.92	22.42
OSB11 2	11.07	601	20.84	63.68	21.93
OSB11 3	11.05	615.1	21.42	64.75	22.77
OSB9 1	10.03	590.9	19.92	57.01	19.95
OSB9 2	10.01	581.8	19.78	56.07	19.07
OSB9 3	9.91	596.6	19.5	55.55	19.58

Nota: SS: Smart Side Panel de espesor 11.1mm.  
 OSB11: OSB Estructural de espesor 11.1 mm.  
 OSB9: OSB Estructural de espesor 9.5 mm.

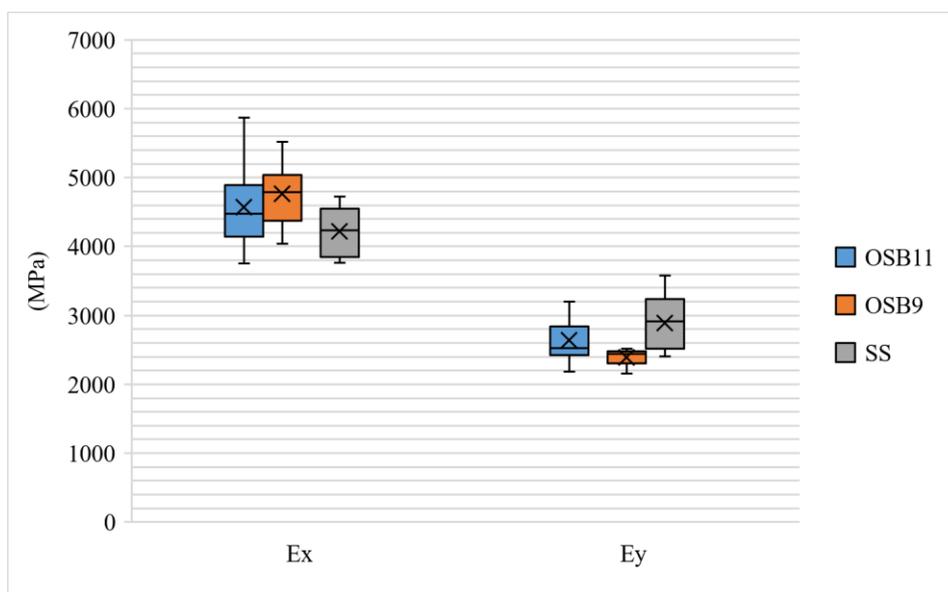
Como se puede observar en la Tabla 2, los paneles a estudiar tienen espesores cercanos a 11.1 mm para los paneles SS y OSB11, y de 9.5 mm para los paneles OSB9, lo que concuerda con las especificaciones técnicas entregadas por los fabricantes. La densidad de los paneles varía entre 581.8 y 659.6 kg/m<sup>3</sup>. Los valores de la frecuencia fundamental presentaron rangos de [19.5 Hz a 21.42 Hz], [55.55 Hz a 66.8 Hz] y [19.07 Hz a 22.77 Hz] para los modos de vibrar (2,0), (0,2) y (1,1) respectivamente.

## 4.2 Obtención de constantes elásticas

En este subcapítulo se muestran las constantes elásticas obtenidas para los distintos tipos de paneles OSB, posteriormente se realiza un análisis estadístico para caracterizar estos resultados.

### 4.2.1 Módulos de elasticidad

Se analiza el módulo de elasticidad en sentido paralelo ( $E_x$ ) y perpendicular a la fibra ( $E_y$ ) para todas las muestras de los paneles OSB. Para observar el comportamiento de estas constantes elásticas se realiza un gráfico de caja, que muestra el valor de las 36 muestras de paneles OSB en sus diferentes tipologías, el cual se muestra en la Figura 13.

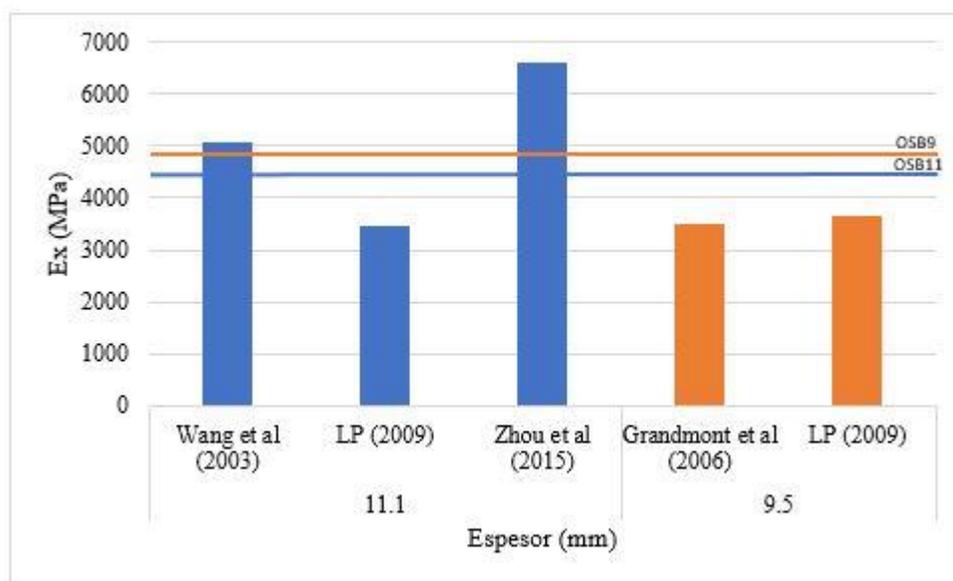


**Figura 13. Módulos de Elasticidad en función del espesor y tipo de panel**

De los resultados obtenidos en la Figura 13, se desprenden los siguientes comentarios:

- Para el módulo de elasticidad  $E_x$  se puede observar que no existe una variación significativa de la media de  $E_x$  al comparar los paneles OSB11 y OSB9, la que ronda el 4%. Por otro lado, al comparar los paneles OSB11 con los paneles SS, se puede distinguir que los paneles SS presentan valores un 8% más bajos y con una menor variabilidad en los datos.
- Para el módulo de elasticidad  $E_y$  se evidencia que para los paneles OSB11 y OSB9 existen diferencias cercanas al 10% entre las medias de los datos, presentando valores de módulo de elasticidad  $E_y$  mayores para los paneles OSB11. Por otro parte, al comparar los paneles OSB11 con los paneles SS, se puede observar que los paneles SS presentar valores mayores de  $E_y$ . En relación a la variabilidad de los datos, los paneles OSB11 y SS presentan un coeficiente de variación de 12% aproximadamente.
- Al comparar las dos direcciones de análisis se puede observar que para los paneles OSB11 Y OSB9, existen diferencias promedio de un 42% y 50% respectivamente, en cambio al analizar lo que ocurre con los paneles SS, existen diferencias menores, las que en promedio ascienden a un 31%. En términos generales, el módulo de elasticidad paralelo a la fibra ( $E_x$ ) presenta valores mayores que el módulo de elasticidad perpendicular ( $E_y$ ) debido a la orientación de las virutas del panel.

De acuerdo a los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica realizada, es posible comparar los resultados de ensayos dinámicos obtenidos en esta investigación, con resultados de ensayos estáticos elaborados por diferentes autores. A continuación, en la Figura 14, se muestra una comparación del módulo de elasticidad paralelo a la fibra desarrollado bajo la metodología propuesta y los que se encuentran en la literatura. Cabe señalar que las líneas horizontales dispuestas en el gráfico presentan los valores obtenidos en esta investigación.

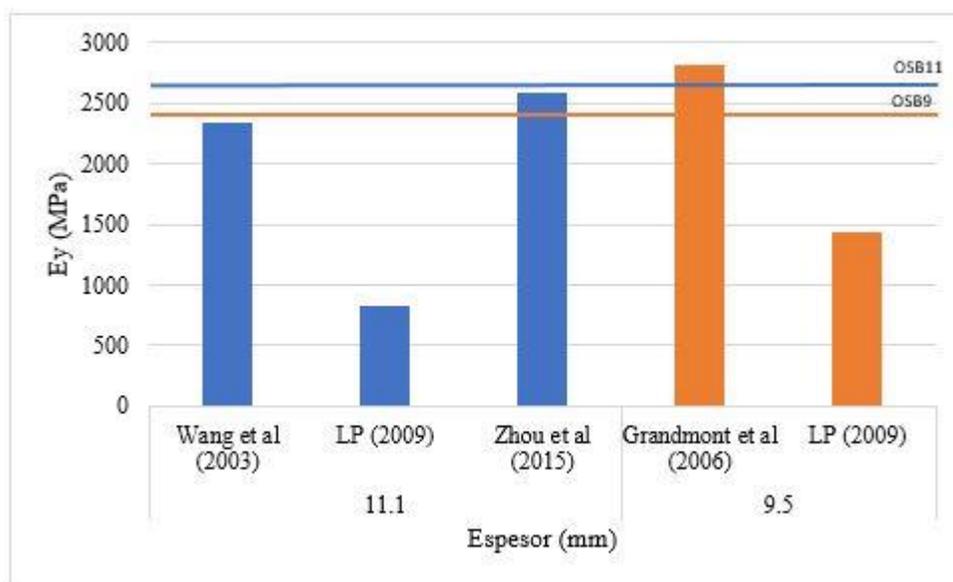


**Figura 14. Comparación del módulo de elasticidad  $E_x$  con respecto a otros autores**

De la Figura 14 se desprende que los valores de  $E_x$  para los paneles de espesor de 11.1 mm ensayados, se acercan parcialmente a lo obtenido por otros autores, estableciendo valores similares con Wang et al (2003), valores más bajos en un 31% a los obtenidos por Zhou and Chui (2015) y valores de mayor magnitud en un 24% que los propuestos por fichas técnicas entregados por LP (2009). Por otra parte, al analizar los paneles de espesor de 9.5 mm, se puede observar una tendencia en la cual los valores obtenidos a través de los ensayos, son mayores que los propuestos por empresas manufactureras (LP, 2009) y valores obtenidos por Grandmont et al (2006), obteniendo diferencias cercanas al 25%.

La diferencia obtenida entre los distintos autores y los valores alcanzados en esta investigación, se pueden explicar debido a que no todos los paneles son fabricados con las mismas especies madereras.

Por otro lado, al analizar el Módulo de Elasticidad perpendicular a la fibra ( $E_y$ ), es posible comparar los resultados obtenidos mediante ensayos dinámicos con resultados de ensayos estáticos realizados por diferentes autores. A continuación, en la Figura 15, se puede observar una comparación de  $E_y$  obtenido bajo la metodología propuesta y valores encontrados en la literatura.



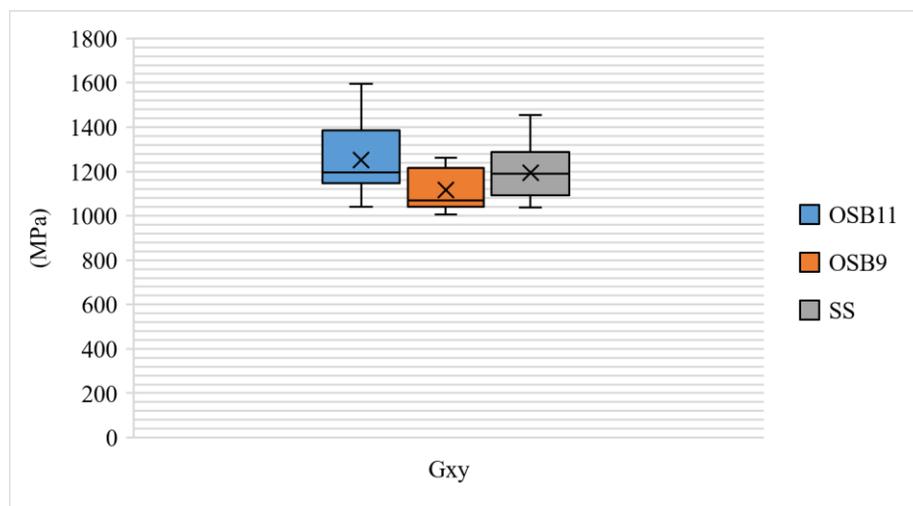
**Figura 15. Comparación del módulo de elasticidad  $E_y$  con respecto a otros autores**

De la Figura 15, se puede distinguir que para ambos espesores (9.5 mm y 11.1 mm), los valores obtenidos son cercanos a lo propuesto por otros autores, no así con lo entregado por empresas dedicadas a la fabricación de paneles OSB (LP, 2009) donde existen diferencias significativas, encontrándose valores menores en catálogos técnicos entregados por la empresa fabricante. Para los paneles de espesor 9.5 mm estas diferencias son de 40% mientras que para paneles de 11.1 mm la diferencia asciende a 69%.

Al realizar un análisis detallado de la literatura, no es posible encontrar valores comparables para los paneles Smart Side (SS) para Módulos de Elasticidad  $E_y$ .

#### 4.2.2 Módulo de Corte

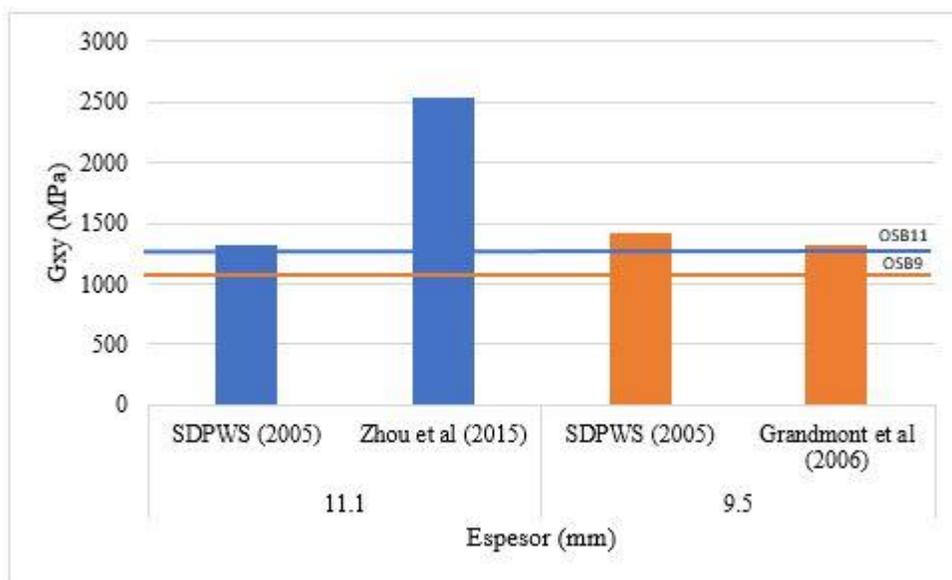
Para visualizar el comportamiento del módulo de corte en paneles OSB, se realizó un gráfico de caja, el cual contempla los valores obtenidos de las 36 muestras de paneles ensayados, el que se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Módulos de Corte en función del tipo de panel**

De los resultados que se muestran en la Figura 16, se desprende que el Módulo de Corte para paneles OSB11 presentan valores más altos en un 11% y con mayor variación que para los paneles OSB9. Por otro lado, al comparar los paneles OSB11 y SS, se puede apreciar que existe una similitud considerable, ya que al comparar las medias y variabilidades las brechas existentes son muy escasas, cercanas al 4% entre la media del módulo de corte para ambos paneles.

Conforme a los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica elaborada, es posible realizar una comparación entre los resultados de ensayos dinámicos y resultados de ensayos estáticos propuestos por diferentes autores. En la Figura 17 se muestra una comparación de los valores obtenidos para Módulo de Corte (Gxy) y valores encontrados en la literatura.



**Figura 17. Comparación del Módulo de Corte con respecto a otros autores**

De la Figura 17, se puede observar que los valores obtenidos para los paneles OSB9 se asemejan bastante a los propuestos por el Código de Diseño Norteamericano para estructuras de madera (SDPWS, 2005), encontrándose diferencias no mayores al 21%. De la misma forma, se obtienen diferencias del 15% al realizar la comparación a lo propuesto por Grandmont (2006). Por otra parte, al analizar lo que ocurre con los paneles OSB11, se puede apreciar que los valores obtenidos mediante los ensayos experimentales presentan diferencias del 5% a los entregados en la tabla C4.2.2A propuestos por el SDPWS (2005). No ocurre así para lo entregado por Zhou and Chui (2015), donde se expresa una diferencia del 51% al comparar el módulo de corte para paneles de 11.1 mm. Una de las posibles razones que puede explicar esta diferencia, es la naturaleza de los paneles OSB ensayados, ya que no todos los ensayos fueron realizados para paneles provenientes de la misma empresa fabricante ni de la misma nacionalidad.

No es posible realizar una comparación para los paneles Smart Side (SS), ya que no fue posible encontrar valores en la literatura.

### 4.3 Análisis estadístico

Con el fin de comparar de manera eficaz los resultados obtenidos para los distintos tipos de paneles OSB, se realiza una prueba “t” de dos muestras que permite contrastar las constantes elásticas

dependiendo del tipo y espesor del panel. En este análisis estadístico se asume una significancia estadística ( $\alpha$ ) de un 5% y una potencia estadística ( $1 - \beta$ ) de un 80%, este valor es comúnmente utilizado en investigaciones científicas en el ámbito de la ingeniería.

La prueba “t” de dos muestras permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de dos muestras coinciden, frente a la hipótesis alternativa de que las medias de las dos muestras difieren en cuanto a su valor esperado. Este contraste es fundamental en el análisis de datos debido a que el principal objetivo de esta investigación consiste en determinar el efecto que produce el espesor y el tipo de panel OSB, en el cálculo de las constantes elásticas estudiadas.

El procedimiento para realizar la prueba estadística se basa en que la distribución de la media de la muestra siga una distribución normal, por lo tanto, resulta necesario comprobar que los datos se distribuyan de manera normal. Esta demostración en base a estadística descriptiva se encuentra en el ANEXO D.

A continuación, en la Tabla 3 se muestran los principales parámetros estadísticos para realizar el análisis mencionado.

**Tabla 3. Resultados de la prueba “t” de dos muestras para cada constante elástica**

Variable	Constante Elástica	Tipología	Media	Desviación Estándar	CV	Error Estándar de la media	t	GL	Valor “p”	
Espesor	Ex	OSB9	4764	415	9%	120	-0.9	22	0.365	
		OSB11	4571	586	13%	169				
	Ey	OSB9	2395	114	5%	33	2.52	13	0.025	
		OSB11	2638	313	12%	90				
	Gxy		OSB9	1116	93.5	8%	27	-2.5	22	0.022
			OSB11	1251	166	13%	48			
Tipo de panel	Ex	SS	4220	348	8%	100	-1.8	22	0.087	
		OSB11	4571	586	13%	169				
	Ey	SS	2891	382	13%	110	-1.8	22	0.09	
		OSB11	2638	313	12%	90				
	Gxy		SS	1193	127	11%	37	-1	22	0.345
			OSB11	1251	166	13%	48			

Nota: CV: Coeficiente de Variación

GL: Grados de Libertad

Se puede observar en la Tabla 3, que los valores obtenidos de  $E_x$ ,  $E_y$  y  $G_{xy}$ , son homogéneos y fiables para realizar un análisis estadístico, ya que el coeficiente de variación (CV) no supera el 13%.

Al analizar la incidencia del espesor en las constantes elásticas estudiadas, de acuerdo a la Tabla 3, se puede distinguir que no existe diferencias significativas cuando se analiza la constante  $E_x$ , ya que el valor “p” es de 0.365. Esto se ve reflejado en la homogeneidad de las dos muestras, ya que sus desviaciones estándar tienden a ser similares. Por otra parte, las constantes elásticas  $E_y$  y  $G_{xy}$ , presentan diferencia estadística significativa, con valores de “p” de 0.025 y 0.022 respectivamente.

De los resultados obtenidos para el análisis del efecto del tipo de panel en la determinación de las constantes elásticas en estudio (véase en la Tabla 3), se puede distinguir que en general todas las constantes no presentan diferencias significativas entre tipos de paneles. Sin embargo, los valores “p” de las constantes  $E_x$  y  $E_y$  son relativamente menores que el valor “p” para la constante  $G_{xy}$ , lo que indica que los módulos de elasticidad presentan diferencias menores entre tipos de panel OSB, no así el módulo de corte.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En la presente investigación se logró determinar las constantes elásticas de paneles OSB mediante un método no destructivo basado en el análisis modal. Esto se realizó para un total de 36 muestras, comparando entre dos espesores y dos tipos de paneles. De los resultados obtenidos y del análisis realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Se logró obtener una base de datos de módulos de elasticidad y de corte en paneles OSB mediante un método no destructivo basado en la vibración de placas ortotrópicas. Esto se realizó para evaluar la relación entre el espesor y el tipo de panel, determinando su importancia en la obtención de las constantes elásticas.

De acuerdo a la información recopilada se obtuvo una visión general de ensayos estáticos y dinámicos para obtener las propiedades mecánicas de materiales derivados de la madera. Logrando identificar ventajas y desventajas de los distintos métodos de ensayo, donde cabe recalcar que los métodos estáticos no son representativos de todo el panel. Esto se debe a que solo se analizan las propiedades mecánicas localmente y no de la pieza completa. Por otro lado, se logró identificar que los métodos de ensayos dinámicos son representativos de todo el panel y además involucran un menor tiempo de ensayo y ahorro de material.

Se consiguió estudiar y adaptar la técnica no destructiva de evaluación de constantes elásticas a través de la vibración del panel y el análisis modal experimental. Se escogió el método de cálculo a desarrollar, el cual es de naturaleza no destructiva, identificando las variables necesarias para la obtención de las constantes elásticas. Se logró adaptar la técnica a las condiciones disponibles en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Bío-Bío, con el fin de replicar las condiciones de borde planteadas en la metodología.

Se realizó un diseño del experimento, cuyas variables de interés fueron el tipo de panel y espesor, lo que generó un total de 36 muestras a evaluar. Se ensayó el total de muestras a través de un método dinámico basado en la vibración de paneles ortotrópicos, donde se obtuvieron los módulos de elasticidad y de corte en los paneles OSB.

De los datos obtenidos para las constantes elásticas se identificó que el módulo de elasticidad perpendicular a la fibra es un 45% más bajo que el módulo de elasticidad paralelo a la fibra. Al comparar estos resultados con otras investigaciones, se evidenció que generalmente los valores no se alejan más de un 29% con respecto a lo obtenido, sin embargo, al comparar con valores de empresas fabricantes, se evidencian diferencias de hasta un 69%.

Por otro lado, al analizar lo que ocurre con el módulo de corte, se identificó que existen diferencias de hasta un 22% entre lo obtenido y lo propuesto en códigos de diseño. En cambio, al comparar con investigaciones anteriores se alcanzan diferencias de hasta un 50%. Estas diferencias pueden ser explicadas debido a la naturaleza de la fabricación de los paneles, debido a que no todos los paneles provienen de las mismas especies de madera. Otra de las posibles razones, es que se realizó la comparación entre métodos estáticos y dinámicos, donde el primero se caracteriza por mostrar propiedades locales del panel, en cambio los métodos dinámicos entrega información representativa del panel completo.

De la obtención de los resultados de constantes elásticas, se generó una base de datos propicia para un análisis estadístico y se logró determinar la influencia del espesor y tipo de panel en la obtención estas constantes. En este análisis se encontró que el espesor del panel es una variable significativa cuando se analiza el módulo de elasticidad perpendicular a la fibra ( $E_y$ ) y el módulo de corte ( $G_{xy}$ ), no así al analizar el módulo de elasticidad paralelo a la fibra ( $E_x$ ). Por otro lado, al analizar la incidencia del tipo de panel en la magnitud de las constantes elásticas, se identificó que este no era relevante a la hora de escoger un tipo de panel.

De este modo se pudo determinar que el método de vibración de placas ortotrópicas es una alternativa real, que presenta confiabilidad y eficacia en los parámetros encontrados para la obtención de propiedades mecánicas para paneles OSB.

## **5.2 Recomendaciones**

A partir de las conclusiones obtenidas, se pueden establecer algunas recomendaciones y futuras líneas de investigaciones, de las cuales se destacan:

En general, se recomienda utilizar la metodología aplicada, ya que es un método rápido y fácil de implementar, además de entregar resultados confiables aplicables a la ingeniería estructural. Por

otro lado, se recomienda ampliar esta investigación, analizando las distintas condiciones de borde propuestas por otros autores.

Se aconseja complementar esta tesis realizando ensayos estáticos a los paneles estudiados y establecer las brechas existentes entre ambos métodos, obteniendo una validación de la técnica no destructiva.

Una futura línea de investigación de gran interés se encuentra en ampliar los resultados obtenidos en esta tesis, realizando la metodología propuesta para todos los espesores y tipos de paneles que se encuentran en el mercado, para así tener una visión global de las propiedades mecánicas de los paneles OSB. Del mismo modo, se propone evaluar la metodología planteada en esta investigación para diferentes paneles en base a madera.

## 6. REFERENCIAS

1. ASTM. 2011a. Standard Test Methods for Structural Panels in Flexure Designation D3043-00. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
2. ASTM. 2011b. Standard Test Method for Shear Modulus of Wood-Based Structural Panels. Designation D3044-94. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
3. Biblis, E.J. 1989. Properties of commercial OSB from three Southern Pine mills. *Forest Products Journal*. 39(1): 55–57.
4. Bos, F.; Casagrande, S. B. 2003. On-line non-destructive evaluation and control of wood-based panels by vibration analysis. *J. Sound Vib.* 268(2): 403-412.
5. Cabrero, J. (j M.). (2009). esMADERA: eficiente y sostenible. Madera Aplicada al Diseño de Estructuras con un Rendimiento Alto. Recuperado a partir de <http://dadun.unav.edu/handle/10171/4681>
6. Grandmont J.-F. et al. Determination of Engineering Properties and Modeling of Wood I-Joists, WCTE 2006 (Portland) proceedings.
7. Guan C, Zhang H, Zhou L, Wang X (2015) Dynamic determination of modulus of elasticity of full-size wood composite panels using a vibration method. *Constr Build Mater* 100:201–206.
8. INFOR 2014 [http://wef.infor.cl/sector\\_forestal/sectorforestal.php#/18](http://wef.infor.cl/sector_forestal/sectorforestal.php#/18) Consultado 20 de enero de 2017.
9. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. ICH. 2002, Edificios Chilenos de Hormigón Armado. Comisión de Diseño Estructural en Hormigón Armado y Albañilería. Cámara

- Chilena de la Construcción e Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 1st Edition, June 2002.
10. Kim, C. S.; Dickinson, S. M. 1985. Improved approximate expressions for the natural frequencies of isotropic and orthotropic rectangular plates. *J. Sound Vib.* 103(1): 142-149.
  11. LabVIEW, versión 13.0, Guía de usuario, LabVIEW Professional Development System, National Instruments Chile SPA, 2013.
  12. Larsson, D. 1997. Using modal analysis for estimation of anisotropic material constants. *J. Eng. Mech.* 123(3): 222-229.
  13. Leissa, A. W. 1969. *Vibration of plates*. Ohio State University, Columbus.
  14. LP Building Products. (2016.). Consultado 27 de diciembre de 2016, recuperado a partir de <http://www.lpchile.cl/es-ES/>
  15. MATLAB, versión R2014a, Guía de usuario: *Analyze and design the systems*. Natick, MA United States, 2014.
  16. MINITAB, versión 17.3.1, Guía de usuario: *Quality. Analysis. Results*. Minitab, State College PA., 2017.
  17. MINVU 2014, Código de Construcción Sustentable para Viviendas | Construcción Sustentable. (2014.). Recuperado a partir de <http://csustentable.minvu.cl/consulta-publica/>
  18. Morales EAM. *Técnicas de propagação de ondas na estimativa de propriedades mecânicas de painéis OSB* [tese]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2006.
  19. Nakao, T.; Okano, T. 1987. Evaluation of modulus of rigidity by Dynamic plate shear testing. *Wood and Fiber Science.* 19(4): 332-338.

20. Pu, J.; Tang, R.C.; Davis, W.C. 1992. Creep behavior of commercial oriented strandboard under high relative humidity. *Forest Products Journal*. 42(4): 49–54.
21. Sobue, N.; Kitazumi, M. 1991. Identification of power spectrum peaks of vibrating completely-free wood plates and moduli of elasticity measurements. *Mokuzai Gakkaishi*. 37(1): 9-15.
22. Sobue, N.; Katoh, A. 1992. Simultaneous determination of orthotropic elastic constants of standard fullsize plywoods by vibration method. *Mokuzai Gakkaishi*. 38(10): 895-902.
23. Wang, S.; Gu, H.; Neimsuwan, T.; Wang, S.G. 2003a. Layer thickness swell and related properties of commercial OSB products: a comparative study. In: *Proceedings, 37th international particleboard and composite materials symposium*. 2003 April 7–10. Pullman, WA: Washington State University. 65–76.
24. Zhou, J. H., and Chui, Y. H. (2015). “Influence of boundary conditions on measurement of elastic constants of engineered wood-based panels using modal testing,” in: *19th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 321-332.

## ANEXOS

## Índice de Anexos

ANEXO A. Expresiones matemáticas para condición de borde SFFF y SFSF .....	43
ANEXO B. Códigos en MATLAB.....	44
B.1 Código para encontrar función de respuesta de frecuencia .....	44
B.2 Código para graficar los modos de vibrar.....	46
ANEXO C. Base de datos de las constantes elásticas .....	48
ANEXO D. Verificación de la normalidad de datos.....	52
ANEXO E. Secuencia de ensayo en LABVIEW.....	57
ANEXO F. Modos de vibrar .....	58

## Índice de Figuras de Anexos

Figura D- 1. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_x$ para OBS11.....	52
Figura D- 2. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_x$ para OBS9. ....	53
Figura D- 3. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_x$ para SS.....	53
Figura D- 4. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_y$ para OSB11.....	54
Figura D- 5. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_y$ para OSB9. ....	54
Figura D- 6. Distribución normal Módulo de Elasticidad $E_y$ para SS.....	55
Figura D- 7. Distribución normal Módulo de Corte $G_{xy}$ para OSB11.....	55
Figura D- 8. Distribución normal Módulo de Corte $G_{xy}$ para OSB9.....	56
Figura D- 9. Distribución normal Módulo de Corte $G_{xy}$ para SS.....	56
Figura E- 1. Secuencia en LABVIEW.....	54
Figura F- 1. Modos de vibrar para muestra de panel 1.1 .....	58
Figura F- 2. Modos de vibrar para muestra de panel 1.2 .....	58
Figura F- 3. Modos de vibrar para muestra de panel 1.3 .....	59
Figura F- 4. Modos de vibrar para muestra de panel 1.4 .....	59
Figura F- 5. Modos de vibrar para muestra de panel 2.1 .....	59
Figura F- 6. Modos de vibrar para muestra de panel 2.2 .....	60
Figura F- 7. Modos de vibrar para muestra de panel 2.3 .....	60
Figura F- 8. Modos de vibrar para muestra de panel 2.4 .....	60
Figura F- 9. Modos de vibrar para muestra de panel 3.1 .....	61

Figura F- 10. Modos de vibrar para muestra de panel 3.2 .....	61
Figura F- 11. Modos de vibrar para muestra de panel 3.3 .....	61
Figura F- 12. Modos de vibrar para muestra de panel 3.4 .....	62
Figura F- 13. Modos de vibrar para muestra de panel 4.1 .....	62
Figura F- 14. Modos de vibrar para muestra de panel 4.2 .....	62
Figura F- 15. Modos de vibrar para muestra de panel 4.3 .....	63
Figura F- 16. Modos de vibrar para muestra de panel 4.4 .....	63
Figura F- 17. Modos de vibrar para muestra de panel 5.1 .....	63
Figura F- 18. Modos de vibrar para muestra de panel 5.2 .....	64
Figura F- 19. Modos de vibrar para muestra de panel 5.3 .....	64
Figura F- 20. Modos de vibrar para muestra de panel 5.4 .....	64
Figura F- 21. Modos de vibrar para muestra de panel 6.1 .....	65
Figura F- 22. Modos de vibrar para muestra de panel 6.2 .....	65
Figura F- 23. Modos de vibrar para muestra de panel 6.3 .....	65
Figura F- 24. Modos de vibrar para muestra de panel 6.4 .....	66
Figura F- 25. Modos de vibrar para muestra de panel 7.1 .....	66
Figura F- 26. Modos de vibrar para muestra de panel 7.2 .....	66
Figura F- 27. Modos de vibrar para muestra de panel 7.3 .....	67
Figura F- 28. Modos de vibrar para muestra de panel 7.4 .....	67
Figura F- 29. Modos de vibrar para muestra de panel 8.1 .....	67
Figura F- 30. Modos de vibrar para muestra de panel 8.2 .....	68
Figura F- 31. Modos de vibrar para muestra de panel 8.3 .....	68
Figura F- 32. Modos de vibrar para muestra de panel 8.4 .....	68
Figura F- 33. Modos de vibrar para muestra de panel 9.1 .....	69
Figura F- 34. Modos de vibrar para muestra de panel 9.2 .....	69
Figura F- 35. Modos de vibrar para muestra de panel 9.3 .....	69
Figura F- 36. Modos de vibrar para muestra de panel 9.4 .....	70

## Índice de Tablas de Anexos

Tabla C- 1. Módulos de Elasticidad paralelo y perpendicular a la fibra para panel Smart Side de espesor 11.1 mm. ....	48
Tabla C- 2. Módulos de Elasticidad paralelo y perpendicular a la fibra para panel OSB Estructural de espesor 11.1 mm. ....	49
Tabla C- 3. Módulos de Elasticidad paralelo a la fibra para panel OSB Estructural de espesor 9.5 mm. ....	49
Tabla C- 4. Módulos de Corte para panel Smart Side espesor 11.1 mm. ....	50
Tabla C- 5. Módulos de Corte para panel OSB Estructural espesor 11.1 mm. ....	50
Tabla C- 6. Módulos de Corte para panel OSB Estructural espesor 9.5 mm. ....	51

## ANEXO A. Expresiones matemáticas para condición de borde SFFF y SFSF

La metodología planteada en la presente memoria de título, está basada en la investigación realizada por Zhou and Chui (2015), en la cual destaca la condición de borde como una variable importante para la obtención de las constantes elásticas (módulos de elasticidad y módulo de corte). El método no destructivo utilizado en esta investigación se basa en la condición de borde FFFF, el cual contempla todos los lados libres del panel. Sin embargo, existen otras dos condiciones de borde relevantes: un lado simplemente apoyado y los otros tres libres (SFFF) y un par de lados opuestos libres y el otro par simplemente apoyados (SFSF).

Las ecuaciones para encontrar las constantes elásticas en estudio bajo la condición de borde SFFF, fueron establecidas por los autores Sobue and Katoh (1992). Las expresiones para encontrar el módulo de elasticidad paralelo a la fibra ( $E_x$ ), módulo de elasticidad perpendicular a la fibra ( $E_y$ ) y módulo de corte ( $G_{xy}$ ) se muestran en las ecuaciones 4, 5 y 6 respectivamente.

$$E_x = \frac{12\pi^2 \rho a^4 (1 - \nu_{xy} \nu_{yx}) (4f_{(3,1)}^2 - 36.27f_{(1,1)}^2)}{3805.04h^2} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$E_y = \frac{48\pi^2 \rho b^4 f_{(0,2)}^2 (1 - \nu_{xy} \nu_{yx})}{237.86h^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$G_{xy} = \frac{\pi^2 \rho b^2 b^2 f_{(1,1)}^2}{3h^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde  $(1 - \nu_{xy} \nu_{yx})$  es de 0.99 para la mayoría de los materiales de madera.

Para la condición de borde SFSF se adoptó una expresión de frecuencia aproximada basada en el método de Rayleigh, propuesta por Kim y Dickinson (1985) para la obtención de las constantes elásticas en estudio. Para esto se desarrolló un método de cálculo basado en un proceso de iteración, donde el valor inicial de  $E_x$  se calcula primero usando la frecuencia fundamental  $f(2,0)$ , y los otros valores se establecen como una relación con  $E_x$ . Los detalles sobre el método de cálculo se pueden encontrar en Zhou y Chui (2014).

## ANEXO B. Códigos en MATLAB

### B.1 Código para encontrar función de respuesta de frecuencia

A continuación se muestra el código en MATLAB implementado para graficar las FRF.

```
%Programa para calcular frecuencias con
%análisis modal

clear
clc
close all

%lectura de todos los txt simultaneamente
numfiles=45;
base_datos=zeros(17001,3,numfiles);
factor_g=9.81; % 1 si (m/s2), "g" fraccion de g
a_brut=zeros(17001,numfiles);
f_brut=zeros(17001,numfiles);
t_0=zeros(17001,numfiles);

for i=1:numfiles
    if i<10
        filename=sprintf('panel11-00%d.lvm',i);
        base_datos(:, :, i)=dlmread(filename, '\t', [24 0 17024 2]);
    else
        filename=sprintf('panel11-0%d.lvm',i);
        base_datos(:, :, i)=dlmread(filename, '\t', [24 0 17024 2]);
    end
    a_brut(:, i)=factor_g*base_datos(:, 2, i);
    f_brut(:, i)=base_datos(:, 3, i);
    t_0(:, i)=base_datos(:, 1, i);
    figure
    subplot(2,1,1)
    plot(t_0(:, i), f_brut(:, i))
    grid on
    subplot(2,1,2)
    plot(t_0(:, i), a_brut(:, i))
    grid on
end

fs1=1652;
dt1=1/fs1;
np1=length(a_brut(:, 1));
t1=dt1*[0:np1-1]';

for i=1:numfiles
    %Centrado de señales
    a0(i)=mean(a_brut(:, i));
    f0(i)=mean(f_brut(:, i));
    a_brut_cent(:, i)=a_brut(:, i)-a0(i)*ones(np1, 1);
    f_brut_cent(:, i)=f_brut(:, i)-f0(i)*ones(np1, 1);
end
```

```

%Filtrado de señales
Fnyquist1=(1/dt1)/2;
Wp1=40/Fnyquist1;Ws1=50/Fnyquist1;
Rp1=0.4;Rs1=15;
[Nn1,Wn1]=buttord(Wp1,Ws1,Rp1,Rs1);
[b1,a1]=butter(Nn1,Wn1);
% % figure
% % freqz(b1,a1,512,fs1)
%
%Señal filtrada
a_cent_filt(:,i)=filtfilt(b1,a1,a_brut_cent(:,i));
f_cent_filt(:,i)=filtfilt(b1,a1,f_brut_cent(:,i));% ojo no se si hay que
filtrar la señal de entrada y centrarla
% figure
% plot(t1,[a_cent_filt(:,i)]);
% grid on
% figure
% plot(t1,[f_brut_cent(:,i) f_cent_filt(:,i)]);
% grid on
end

%
%Determinacion de frecuencia natural de vibracion vertical

for j=1:numfiles
N1=2^ceil(log(length(a_cent_filt(:,j)))/log(2));
ff1=1/dt1*(0:N1-1)/N1;
Amp_a=2*fft(a_brut(:,j),N1)/length(a_brut(:,j));
Amp_a_filt=2*fft(a_cent_filt(:,j),N1)/length(a_cent_filt(:,j));
Amp_f=2*fft(f_brut(:,j),N1)/length(f_brut(:,j));
frf=Amp_a./Amp_f;
pasol=ff1(2:length(ff1)/20);
paso2=abs(frf(2:length(ff1)/20));
paso2_a_filt=abs(Amp_a_filt(2:length(ff1)/20));
paso2_imag=imag(frf(2:length(ff1)/20));
figure
plot(pasol,paso2_imag);
%semilogy(pasol,paso2_imag);
grid on
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Amplitud de respuesta');
end

```

## B.2 Código para graficar los modos de vibrar

A continuación se muestra la implementación del código en MATLAB utilizado para graficar los modos de vibrar asociado a los peak de frecuencia identificados.

```

clear
clc
close all
%Para PANEL 11

%Con parte imaginaria de frf
x=0:15:60;
y=0:-15:-120;

%Para peak 1.5 Hz
z_0=[21.44 14.26 20.36 16.64 22.32;11.54 12.11 13.18 12.44 15.86;9.472 7.782
7.85 8.871 13.28;5.393 4.216 4.445 6.374 6.697;1.256 0.7986 0.9858 2.989
4.258;-4.735 -2.736 -1.046 1.295 1.575;-8.392 -4.249 -2.969 -4.543 -4.543;-
10.43 -9.358 -7.017 -7.56 -8.936;-11.31 -9.67 -11.08 -10.69 -12.7];
figure
mesh(x,y,z_0)
title('Peak 1.5 Hz')
pause
close all

%Para peak 20.89 Hz
z_1=[57.82 78.63 108.1 120.4 145.8;6.75 25.66 45.74 65.76 70.55;-42.08 -27.83
-16.61 -10.48 -9.941;-67.56 -63.72 -54.77 -57.98 -77;-64.62 -66.89 -72.57 -
81.03 -97.47;-39.99 -41.61 -52.89 -68.02 -90.81;11.24 7.873 -5.139 -26.64 -
54.45;68.64 69.21 56.93 33.88 9.539;140.4 127.4 115.6 93.97 68.04];
figure
mesh(x,y,z_1)
title('Peak 20.89 Hz')
pause
close all

%Para peak 23.75 Hz
z_2=[-152.9 -97.94 -38.4 31.41 103.8;-121.2 -78.76 -21.72 40.04 101.7;-76.14
-42.67 -3.809 43.27 87.71;-22.68 -8.593 8.136 32.4 51.17;27.77 21.9 18.1
15.64 13.88;67.05 40.22 16.19 -12.88 -36.43;94.68 53.32 6.033 -42.48 -
84.56;96.72 45.89 -10.27 -70.6 -124.2;101.1 41.96 -23.65 -89.48 -153.5];
figure
mesh(x,y,z_2)
title('Peak 23.75 Hz')
pause
close all

%Para peak 52.22 Hz
z_1=[-115.7 -81.25 -18.03 76.75 205.2;-54.38 -45.62 -22.89 23.5 72.43;34.82
4.983 -20.56 -41.72 -54.45;100.4 45.78 -13.54 -76.02 -138.8;141.3 64.53 2.208
-65.51 -130;87.68 48.85 9.321 -30.68 -70.25;15.95 7.719 6.511 13.7 21.28;-
86.2 -46.73 -7.663 45.6 107.5;-165 -119.1 -26.63 67.23 152.5];
figure

```

```
mesh(x,y,z_1)
title('Peak 52.22 Hz')
pause
close all
```

```
%Para peak 59.53 Hz
```

```
z_1=[69 67.26 60.33 46.16 34.22;2.895 7.949 4.556 -6.289 -21.01;-47.33 -35.64
-32.54 -38.8 -49.39;-50.9 -37.63 -32.14 -30.92 -30.49;-9.132 -6.495 0.2506
8.045 16.75;37.81 28.97 31.22 40.32 55.28;50.94 33.96 28.6 34.19 53.8;21.09 -
0.7659 -10.6 -10.2 3.237;-29.85 -53.99 -65.93 -70.93 -60.26];
figure
mesh(x,y,z_1)
title('Peak 59.53 Hz')
pause
close all
```

```
%Para peak 70.7 Hz
```

```
z_1=[158.9 -10.1 -100.6 -43.16 109.8;166.7 6.315 -68.72 -26.79 99.46;148.7
5.894 -53.75 -16.52 98.4;112.9 -5.921 -53.6 -12.21 91.66;79.49 -18.1 -50.81 -
4.806 97.78;67.73 -20.08 -46.15 -4.15 92.9;71.51 -7.871 -39.31 -4.53
84.45;103.5 6.673 -33.74 -8.034 72.33;129.1 20.75 -37.12 -23.27 52.59];
figure
mesh(x,y,z_1)
title('Peak 70.7 Hz')
pause
close all
```

```
%Para peak 82.53 Hz
```

```
z_1=[67.09 -4.47 -42.69 -6.909 78.33;62.85 1.095 -36 -21.52 39.57;54.09 4.494
-22.13 -22.89 -1.21;11.39 3.662 -2.64 -8.801 -12.1;-44.77 -1.097 17.63 13.24
-10.66;-80.02 -4.209 33.74 25.12 22.68;-105.1 -3.6 41.5 15.56 -65.45;-102.2
9.835 45.19 0.09245 -106.3;-85.97 29.3 59.79 0.4199 -129.5];
figure
mesh(x,y,z_1)
title('Peak 82.53 Hz')
```

### ANEXO C. Base de datos de las constantes elásticas

A continuación se muestra en detalle las dimensiones de cada muestra de panel ensayada (espesor, ancho y longitud) y se muestra la densidad de cada una de éstas. Además se pueden observar las frecuencias de los modos de vibrar asociados a cada constante elástica en estudio.

En cada tabla se exponen los datos para los 3 paneles correspondientes a cada tipología, detallada en los 4 cortes establecidos en la metodología de ensayo. Estos paneles se designan de la forma (m,n) donde m corresponde al número del panel ensayado y n corresponde al corte realizado al panel.

**Tabla C- 1. Módulos de Elasticidad paralelo y perpendicular a la fibra para panel Smart Side de espesor 11.1 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Frec (2,0) (Hz)	Frec (0,2) (Hz)	Ex (Mpa)	Ey (Mpa)
1.1	11.177	605	1215	662.51	20.89	70.7	4725.38	3327.48
1.2	11.197	610	1215	637.83	19.59	61.44	3986.47	2491.36
1.3	11.620	605	1220	626.70	21.49	71.69	4448.79	2994.12
1.4	11.637	610	1220	624.13	20.47	63.38	4008.49	2401.76
2.1	10.953	610	1220	668.10	19.30	65.02	4305.15	3053.85
2.2	11.140	600	1220	628.86	18.91	65.84	3760.88	2667.17
2.3	11.043	610	1215	671.37	20.21	70.83	4590.75	3582.62
2.4	11.237	600	1216	632.94	19.20	65.26	3785.37	2592.21
3.1	11.177	605	1213	652.39	19.81	66.63	4156.99	2910.24
3.2	11.997	610	1213	627.82	20.72	65.79	3798.61	2449.29
3.3	10.640	603	1220	685.92	19.04	66.32	4558.79	3300.92
3.4	10.907	610	1220	672.07	19.61	63.12	4509.30	2919.90

**Tabla C- 2. Módulos de Elasticidad paralelo y perpendicular a la fibra para panel OSB Estructural de espesor 11.1 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Frec (2,0) (Hz)	Frec (0,2) (Hz)	Ex (Mpa)	Ey (Mpa)
4.1	10.680	610	1220	620.40	20.40	63.07	4698.04	2806.61
4.2	11.150	610	1220	591.96	20.06	62.43	3976.77	2407.33
4.3	10.960	608	1220	633.23	21.29	64.93	4959.29	2845.34
4.4	11.030	610	1218	584.25	20.47	61.24	4149.16	2336.28
5.1	11.020	607	1220	589.28	20.27	63.93	4138.03	2522.38
5.2	11.113	610	1220	609.88	20.91	64.89	4481.10	2697.20
5.3	11.103	607	1220	597.75	21.40	63.55	4608.58	2490.50
5.4	11.027	611	1220	607.21	20.77	62.36	4471.48	2535.81
6.1	10.843	608	1220	657.45	22.49	66.87	5870.07	3201.12
6.2	11.570	610	1220	565.25	20.71	63.09	3758.86	2180.20
6.3	10.567	608	1220	651.45	20.89	64.93	5284.51	3149.15
6.4	11.233	610	1218	586.38	21.58	64.12	4462.09	2478.29

**Tabla C- 3. Módulos de Elasticidad paralelo a la fibra para panel OSB Estructural de espesor 9.5 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Frec (2,0) (Hz)	Frec (0,2) (Hz)	Ex (Mpa)	Ey (Mpa)
7.1	10.033	607	1220	584.11	19.46	57.98	4560.54	2480.86
7.2	10.127	610	1220	597.91	20.43	57.48	5050.84	2498.85
7.3	9.970	607	1220	571.98	18.99	56.50	4306.87	2336.28
7.4	9.980	611	1221	609.64	20.81	56.07	5519.55	2512.60
8.1	9.827	606	1219	553.37	18.47	54.62	4044.28	2160.16
8.2	9.913	611	1220	595.43	19.96	55.98	5010.01	2479.18
8.3	10.187	606	1221	572.75	20.82	57.33	4982.04	2292.12
8.4	10.103	611	1220	605.74	19.86	56.34	4857.84	2459.48
9.1	9.750	607	1218	577.10	18.56	55.97	4311.95	2418.77
9.2	9.947	611	1219	593.65	19.40	56.09	4671.77	2464.90
9.3	9.887	608	1221	576.74	20.45	54.45	5138.23	2239.62
9.4	10.063	611	1220	598.69	19.60	55.70	4713.61	2394.84

**Tabla C- 4. Módulos de Corte para panel Smart Side espesor 11.1 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Frecuencia (1,1) (Hz)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Gxy (Mpa)
1.1	11.177	605	1215	23.75	662.51	1454.80
1.2	11.197	610	1215	20.84	637.83	1092.39
1.3	11.620	605	1220	24.13	626.69	1325.05
1.4	11.637	610	1220	22.00	624.13	1111.96
2.1	10.953	610	1220	20.91	668.10	1213.61
2.2	11.140	600	1220	20.60	628.85	1037.00
2.3	11.043	610	1215	21.63	671.36	1273.29
2.4	11.237	600	1216	21.36	632.93	1095.72
3.1	11.177	605	1213	21.53	652.38	1173.40
3.2	11.997	610	1213	21.99	627.82	1039.42
3.3	10.640	603	1220	20.23	685.92	1207.76
3.4	10.907	610	1220	21.43	672.06	1293.29

**Tabla C- 5. Módulos de Corte para panel OSB Estructural espesor 11.1 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Frecuencia (1,1) (Hz)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Gxy (Mpa)
4.1	10.680	610	1220	22.49	620.40	1371.30
4.2	11.150	610	1220	21.92	591.96	1140.37
4.3	10.960	608	1220	23.08	633.23	1390.54
4.4	11.030	610	1218	22.20	584.25	1175.85
5.1	11.020	607	1220	21.12	589.28	1068.29
5.2	11.113	610	1220	22.38	609.87	1232.81
5.3	11.103	607	1220	22.55	597.75	1216.88
5.4	11.027	611	1220	21.67	607.21	1172.78
6.1	10.843	608	1220	24.01	657.45	1596.22
6.2	11.570	610	1220	22.25	565.24	1041.97
6.3	10.567	608	1220	22.39	651.44	1448.37
6.4	11.233	610	1218	22.43	586.37	1161.49

**Tabla C- 6. Módulos de Corte para panel OSB Estructural espesor 9.5 mm.**

PANEL	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Frecuencia (1,1) (Hz)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Gxy (Mpa)
7.1	10.033	607	1220	20.62	584.11	1217.65
7.2	10.127	610	1220	18.93	597.90	1041.42
7.3	9.970	607	1220	20.92	571.97	1242.94
7.4	9.980	611	1221	19.33	609.63	1145.60
8.1	9.827	606	1219	19.39	553.37	1058.18
8.2	9.913	611	1220	18.69	595.43	1058.41
8.3	10.187	606	1221	19.50	572.74	1034.16
8.4	10.103	611	1220	18.71	605.74	1038.85
9.1	9.750	607	1218	20.12	577.10	1208.97
9.2	9.947	611	1219	18.32	593.65	1005.45
9.3	9.887	608	1221	19.19	576.73	1077.73
9.4	10.063	611	1220	20.67	598.68	1263.11

### ANEXO D. Verificación de la normalidad de datos

Para realizar el análisis estadístico propuesto en el capítulo 4, se asumió que los valores de las constantes elásticas tenían una distribución normal. Para verificar la validez de la distribución normal de los datos, se aplicó la prueba de normalidad de Anderson-Darling. Esta prueba evalúa si se cumple o rechaza la hipótesis nula, la cual señala que los datos siguen una distribución normal. Si el valor p de la prueba es menor que el nivel de significancia  $\alpha$  que se ha elegido, entonces se debe rechazar la hipótesis nula y concluir que los datos no siguen una distribución normal.

A continuación, se muestran los gráficos de distribución normal para cada constante elástica obtenida.

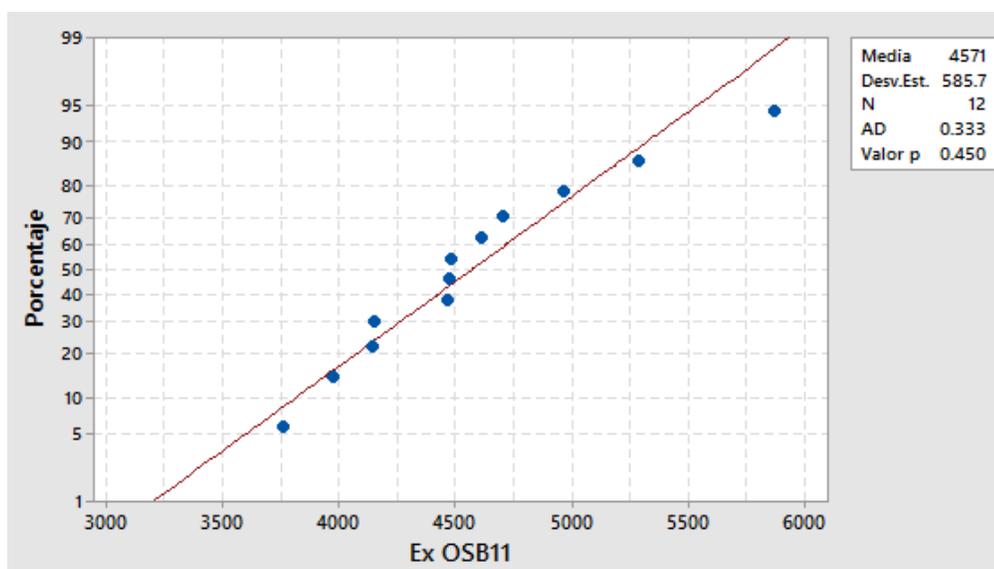


Figura D- 1. Distribución normal Módulo de Elasticidad Ex para OBS11.

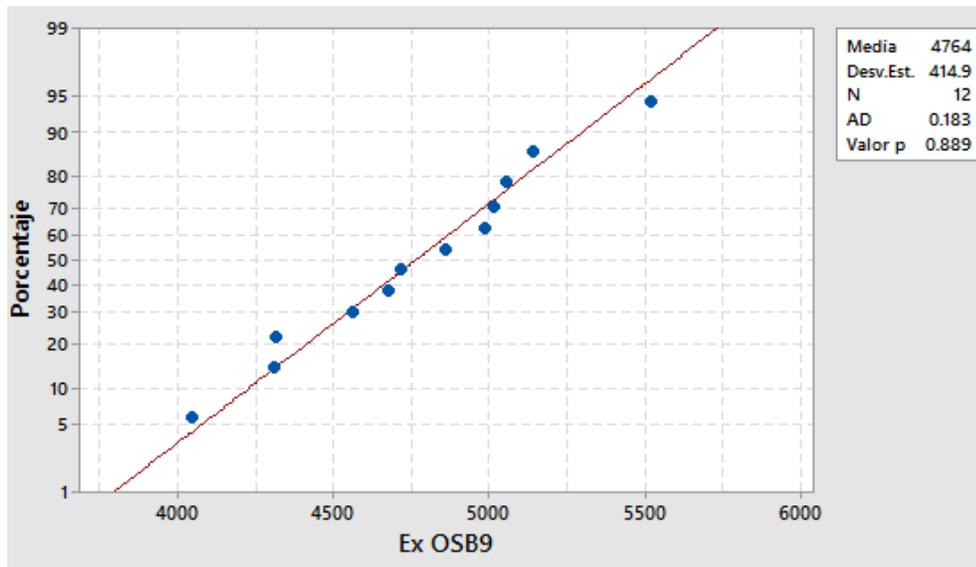


Figura D- 2. Distribución normal Módulo de Elasticidad Ex para OBS9.

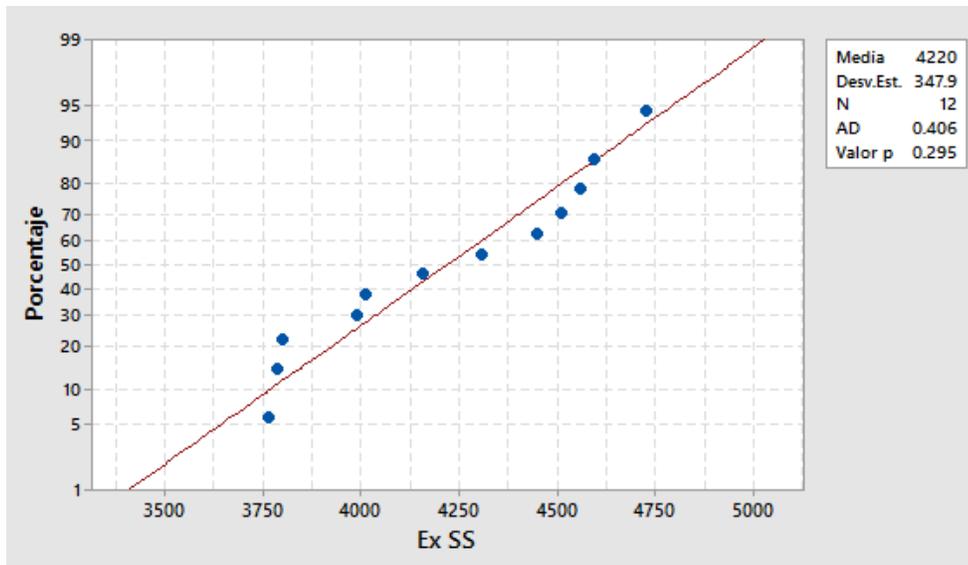


Figura D- 3. Distribución normal Módulo de Elasticidad Ex para SS.

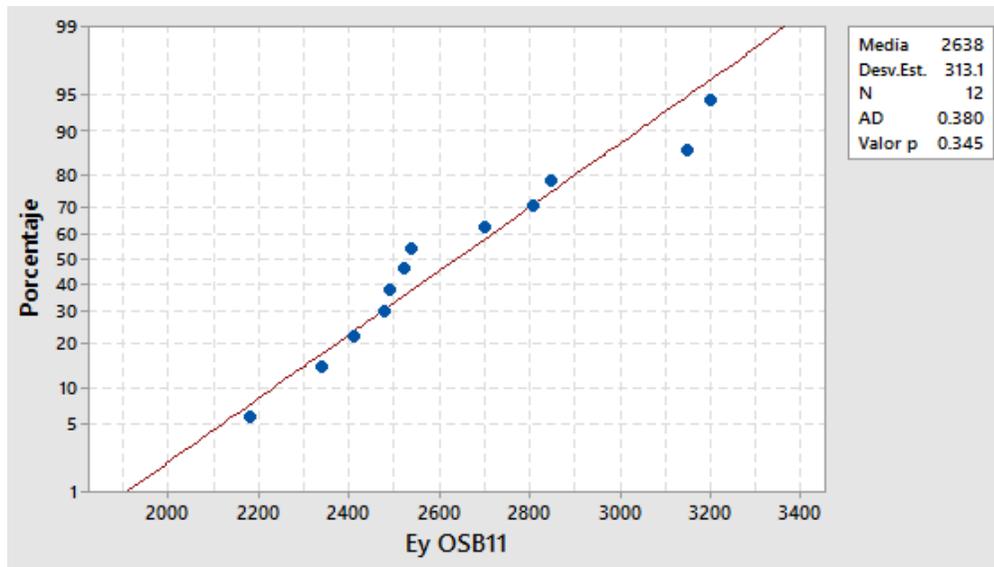


Figura D- 4. Distribución normal Módulo de Elasticidad  $E_y$  para OSB11.

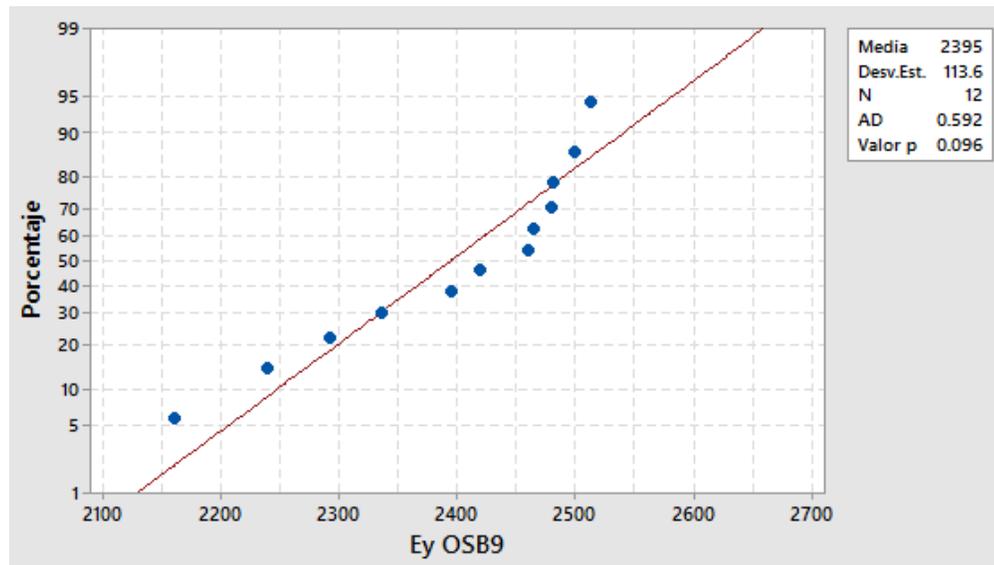
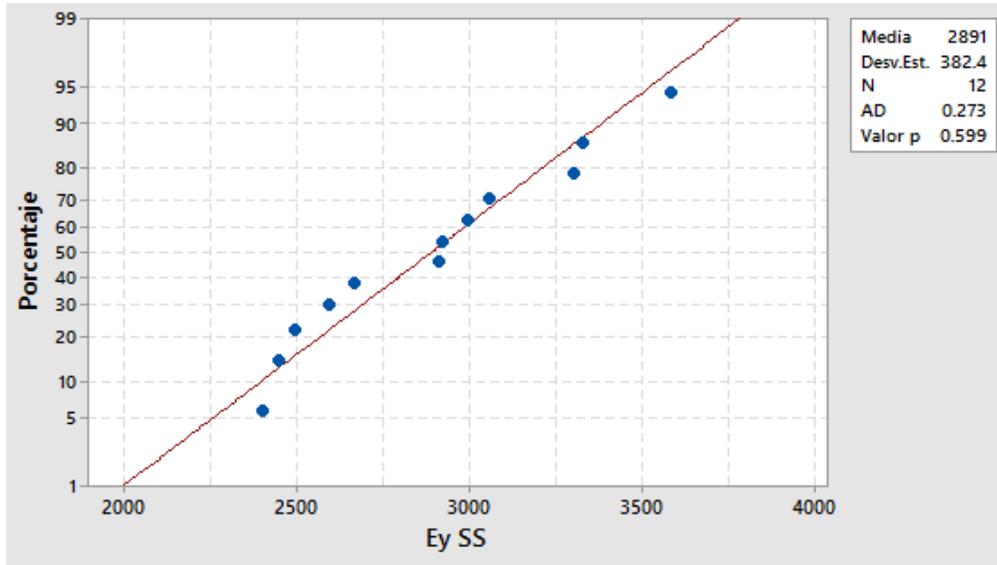
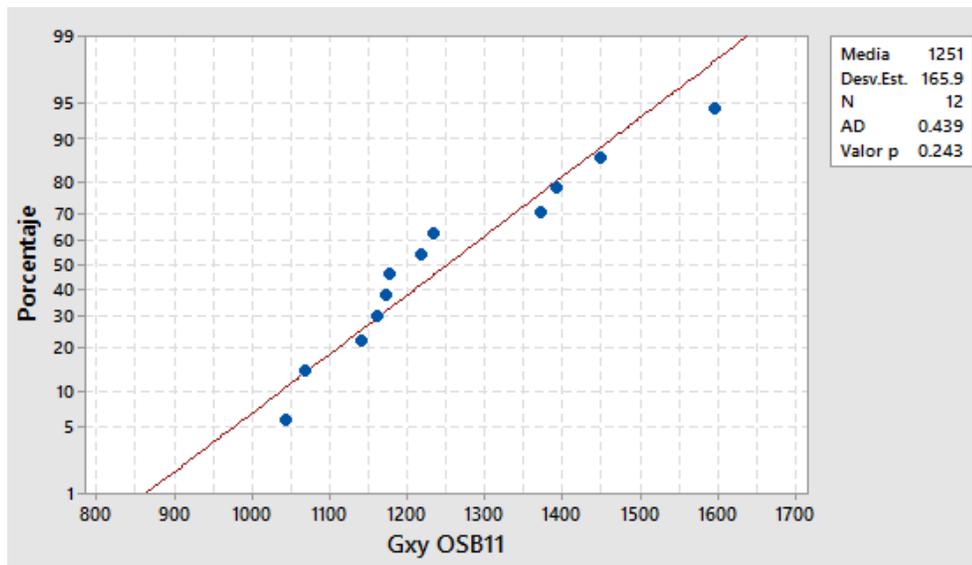


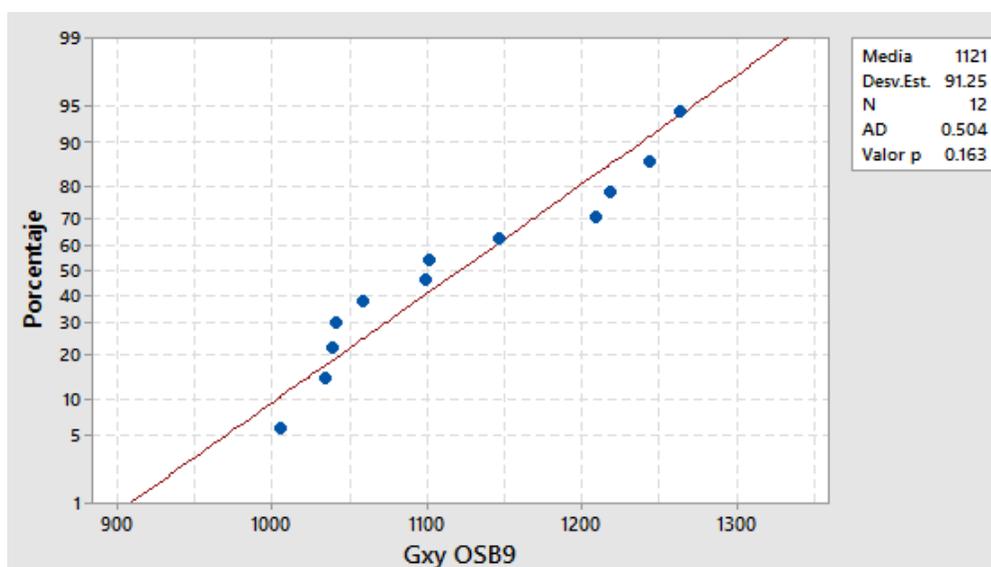
Figura D- 5. Distribución normal Módulo de Elasticidad  $E_y$  para OSB9.



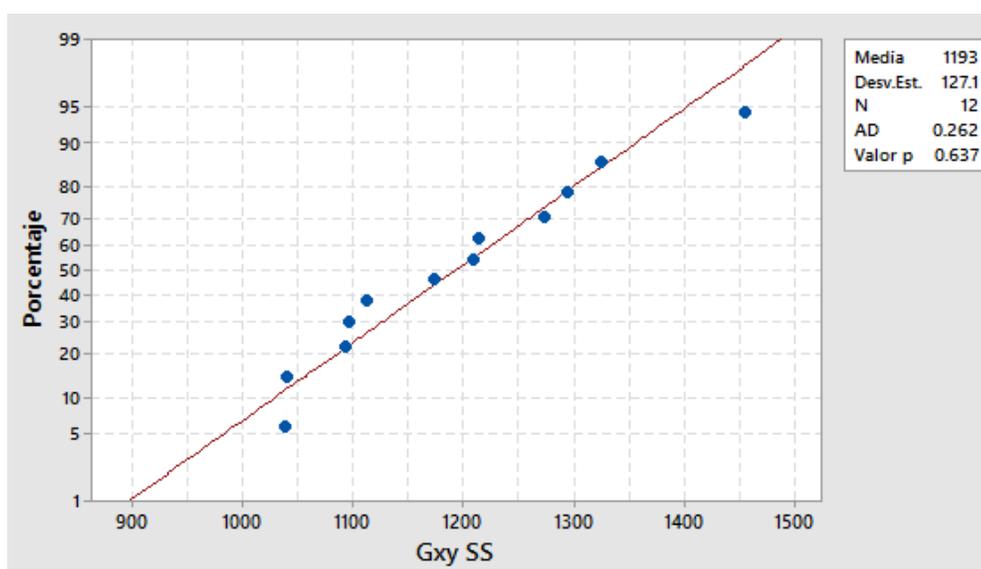
**Figura D- 6. Distribución normal Módulo de Elasticidad  $E_y$  para SS.**



**Figura D- 7. Distribución normal Módulo de Corte  $G_{xy}$  para OSB11.**



**Figura D- 8. Distribución normal Módulo de Corte Gxy para OSB9.**

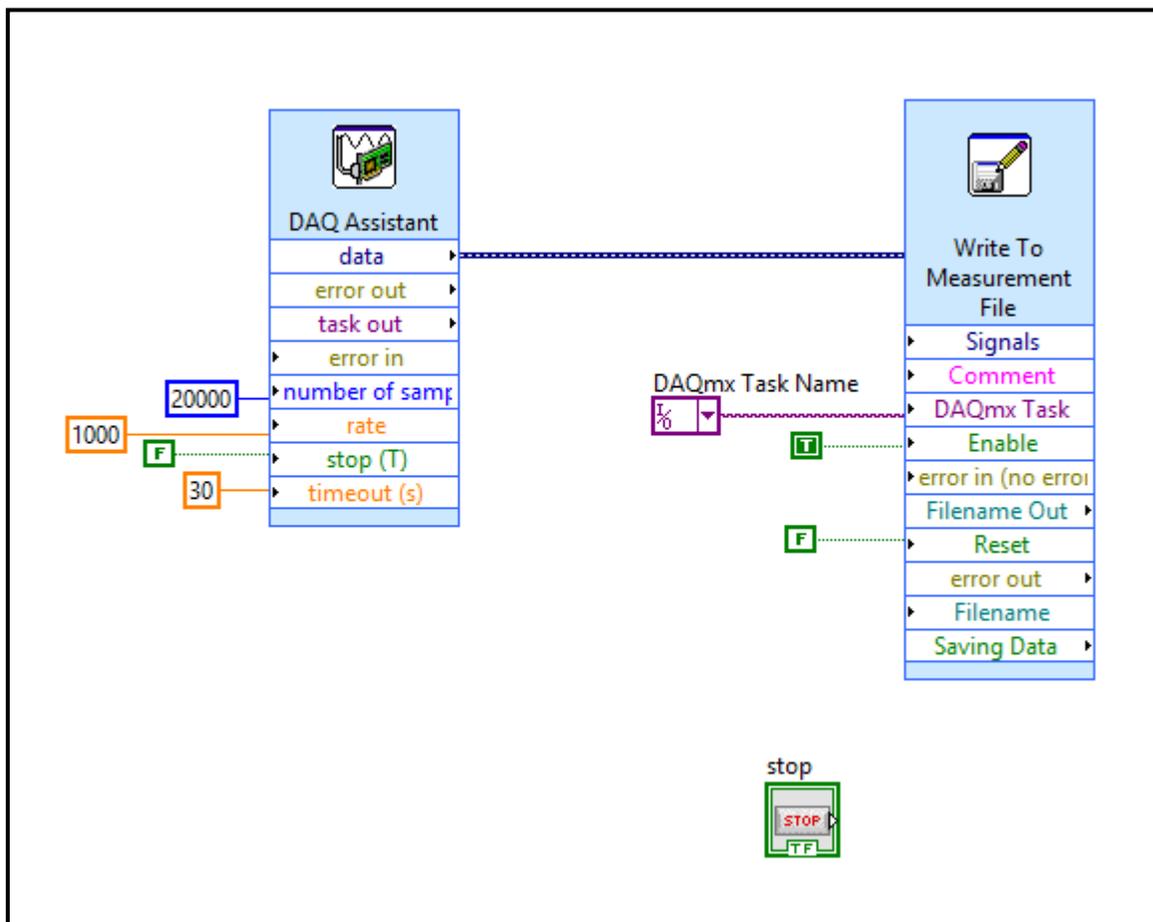


**Figura D- 9. Distribución normal Módulo de Corte Gxy para SS.**

Para este caso el nivel de significancia escogido fue de  $\alpha=0.05$  y el menor valor p obtenido fue de 0.096, el cual es mayor a 0.05, por lo tanto se acepta la hipótesis nula que indica que los datos siguen una distribución normal.

**ANEXO E. Secuencia de ensayo en LABVIEW.**

En la Figura E-1 se muestra la secuencia en el proceso de adquisición de los datos dinámicos de fuerza y aceleración para su posterior almacenamiento, a través del software LABVIEW.

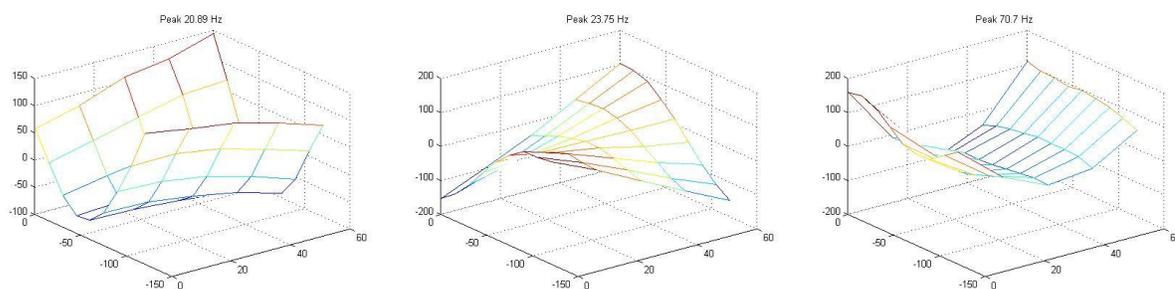


**Figura E- 1. Secuencia en LABVIEW**

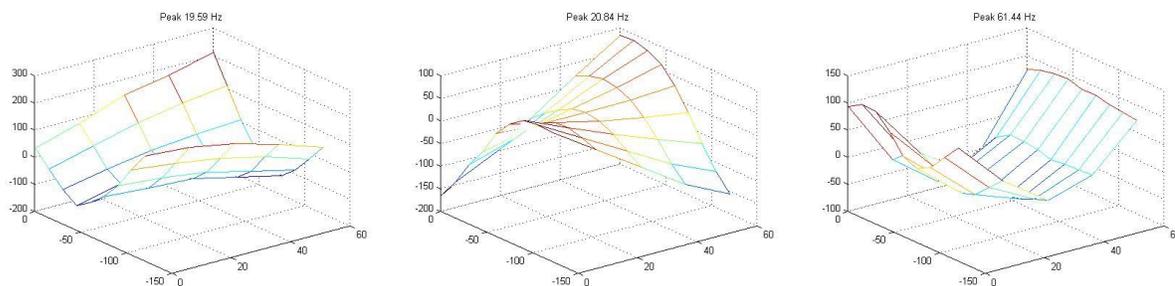
Se puede observar en la Figura E-1, la secuencia en el proceso de obtención de parámetros dinámicos, donde se muestra la configuración de esta metodología.

## Anexo F. Modos de vibrar

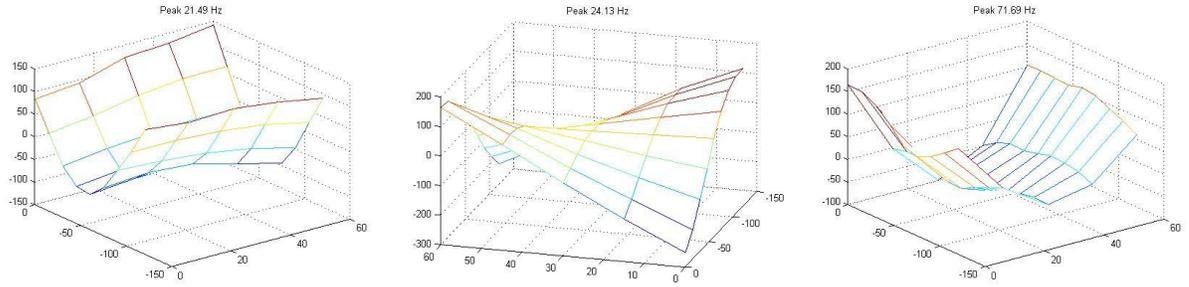
Para la obtención de las constantes elásticas en estudio, fue necesario identificar los modos de vibrar para calcular los módulos de elasticidades y módulo de corte. A continuación se muestra cada modo de vibrar identificado para cada muestra del panel, observándose un total de 36 gráficos de los modos de vibrar (2,0), (1,1) y (0,2) para cada muestra, los cuales son mostrados en ese orden en las Figuras posteriores.



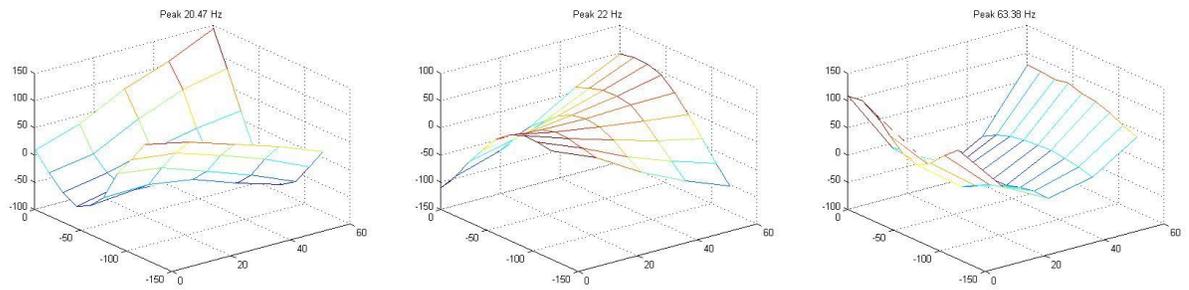
**Figura F- 1. Modos de vibrar para muestra de panel 1.1**



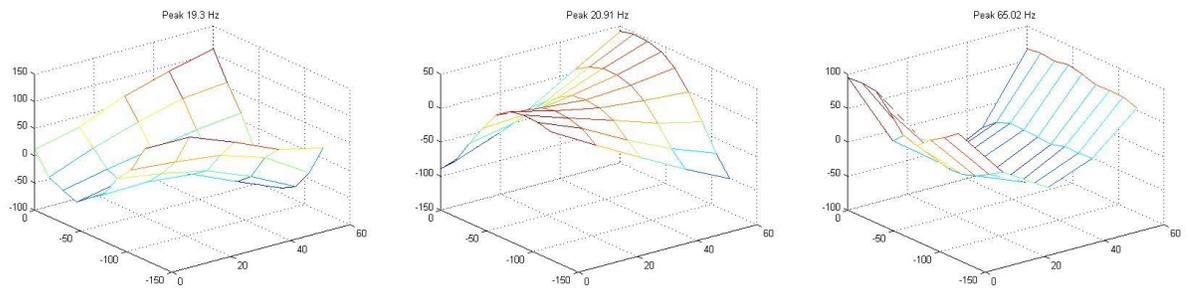
**Figura F- 2. Modos de vibrar para muestra de panel 1.2**



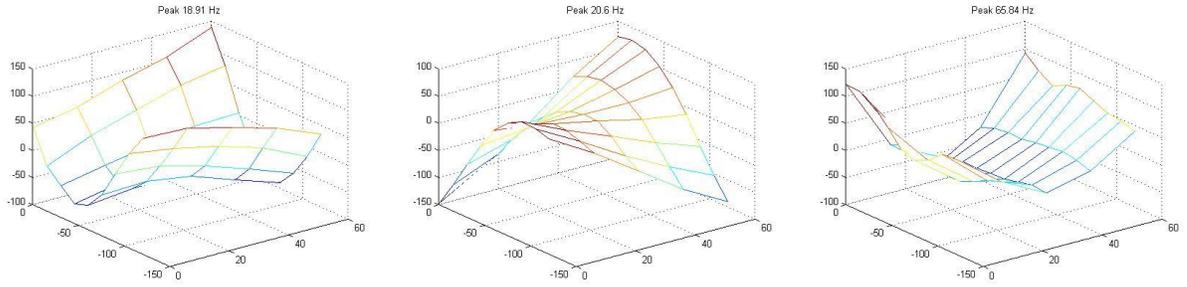
**Figura F- 3. Modos de vibrar para muestra de panel 1.3**



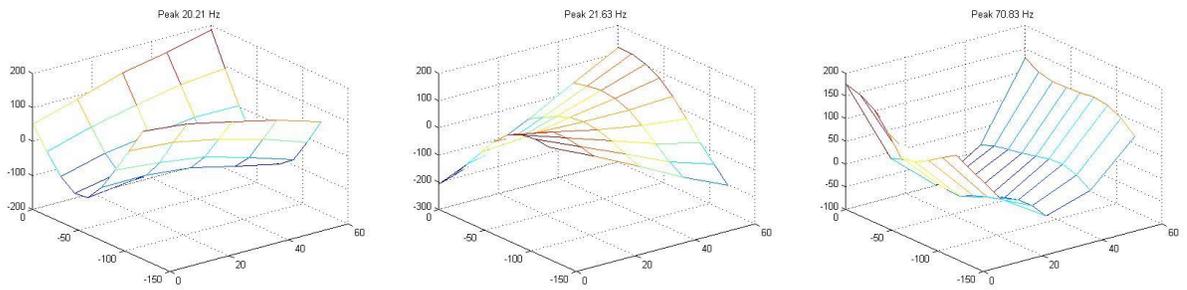
**Figura F- 4. Modos de vibrar para muestra de panel 1.4**



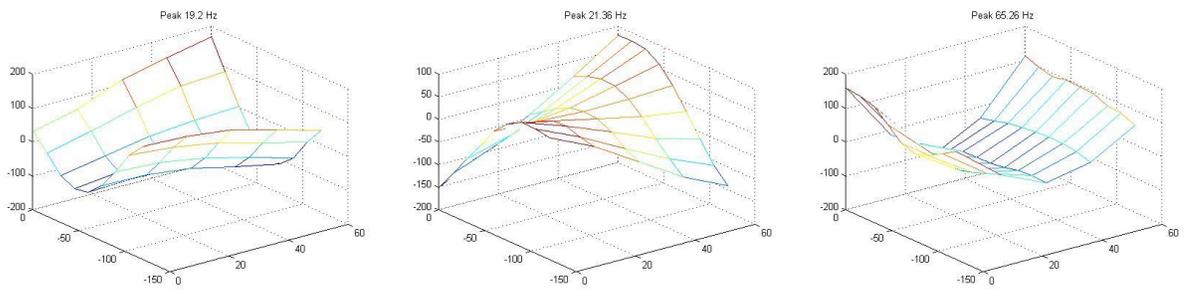
**Figura F- 5. Modos de vibrar para muestra de panel 2.1**



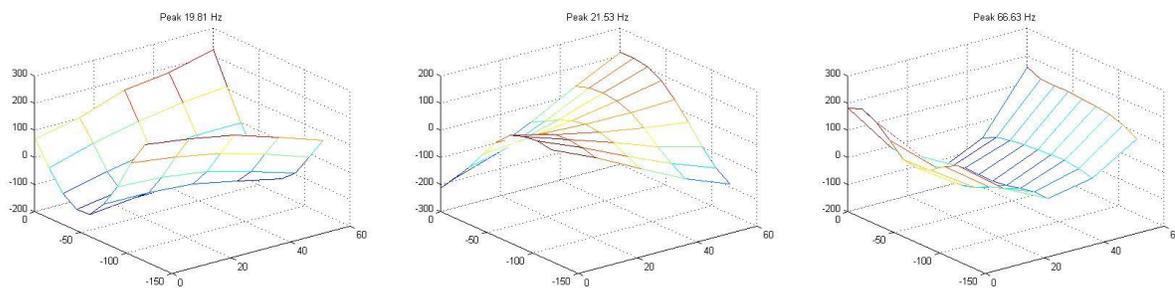
**Figura F- 6. Modos de vibrar para muestra de panel 2.2**



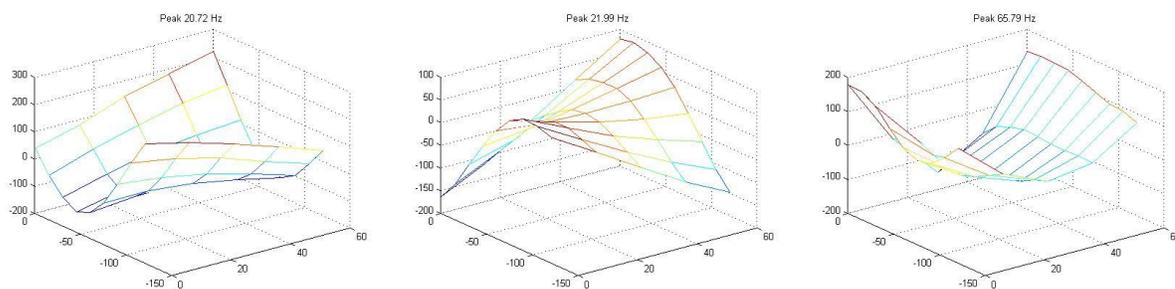
**Figura F- 7. Modos de vibrar para muestra de panel 2.3**



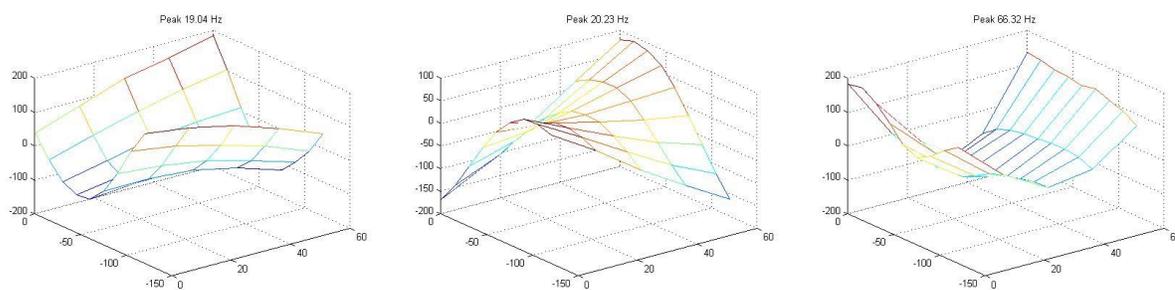
**Figura F- 8. Modos de vibrar para muestra de panel 2.4**



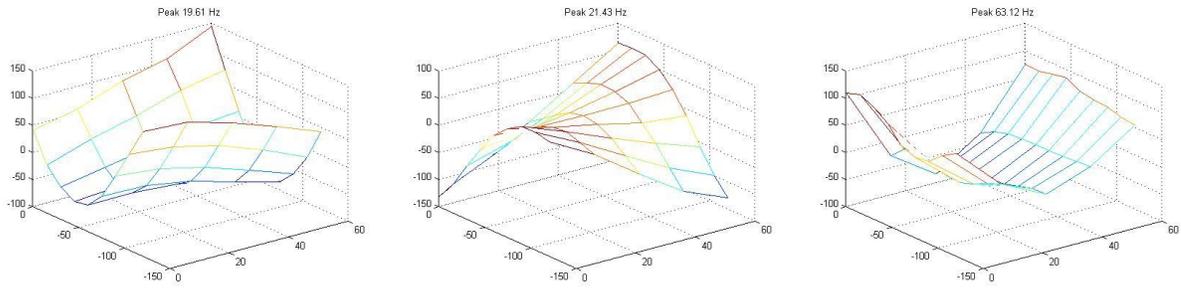
**Figura F- 9. Modos de vibrar para muestra de panel 3.1**



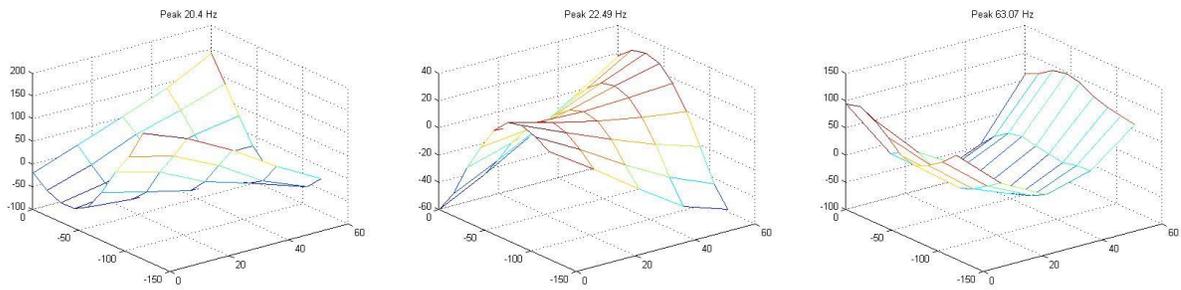
**Figura F- 10. Modos de vibrar para muestra de panel 3.2**



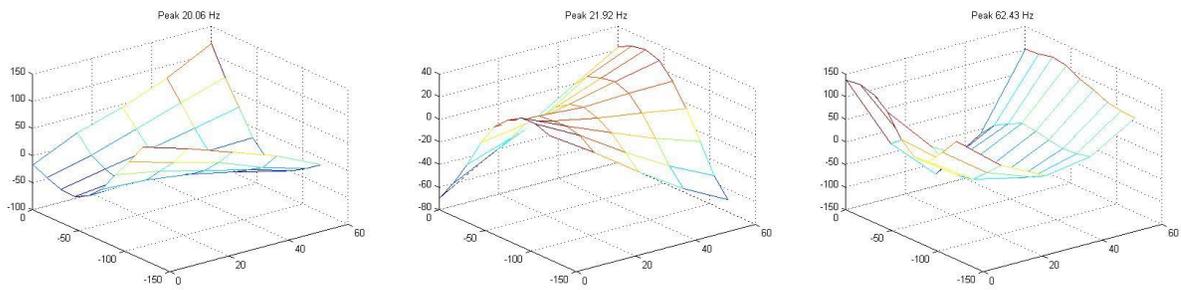
**Figura F- 11. Modos de vibrar para muestra de panel 3.3**



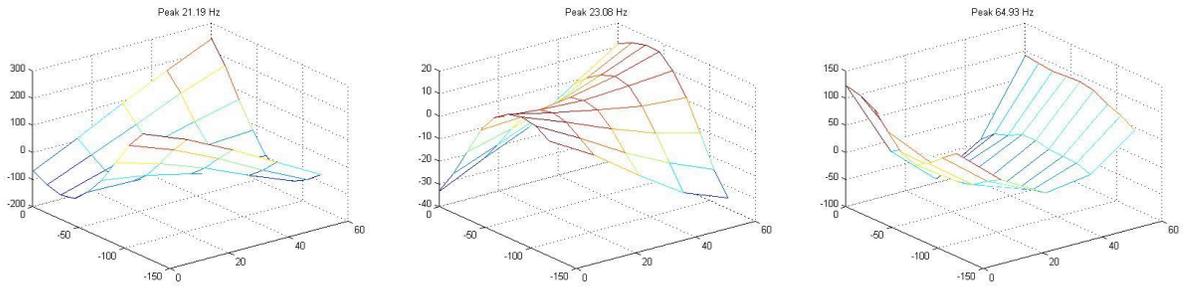
**Figura F- 12. Modos de vibrar para muestra de panel 3.4**



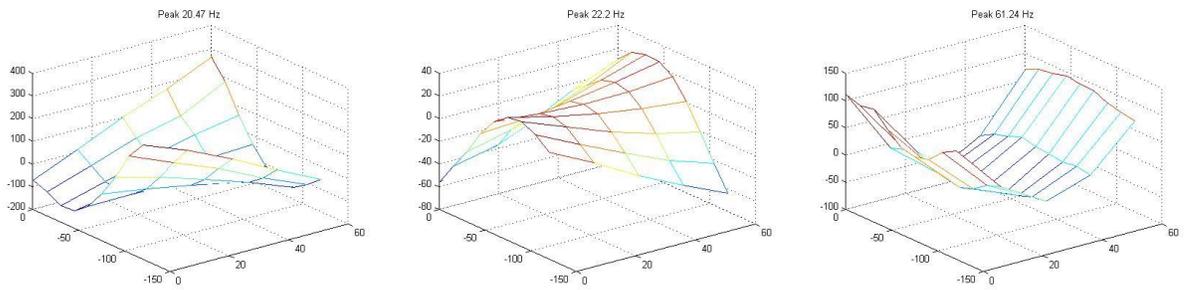
**Figura F- 13. Modos de vibrar para muestra de panel 4.1**



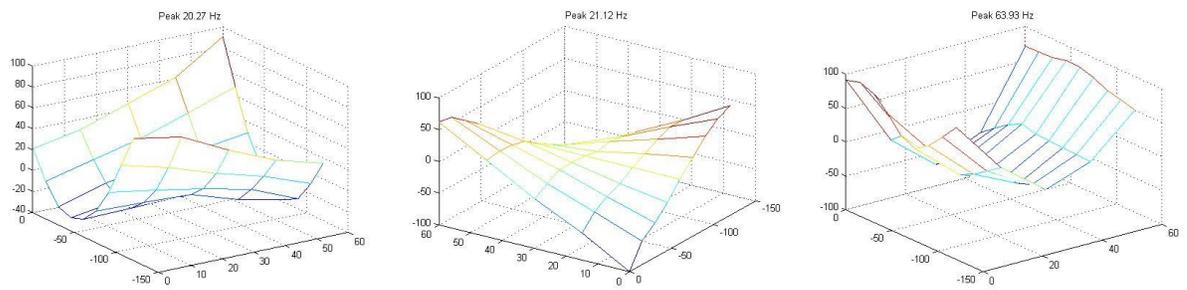
**Figura F- 14. Modos de vibrar para muestra de panel 4.2**



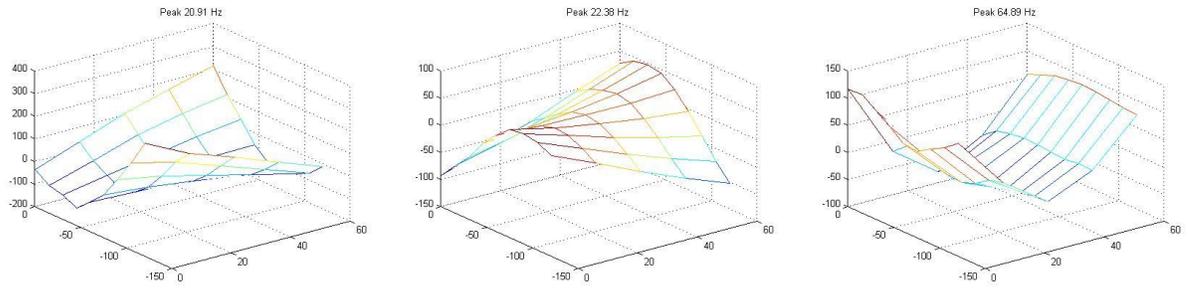
**Figura F- 15. Modos de vibrar para muestra de panel 4.3**



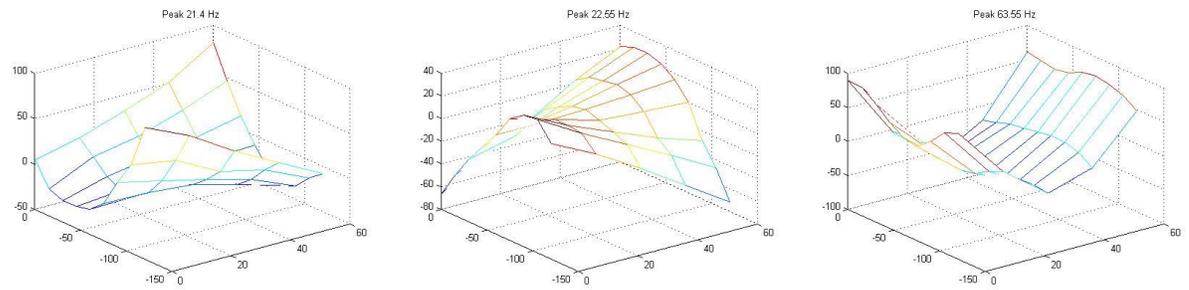
**Figura F- 16. Modos de vibrar para muestra de panel 4.4**



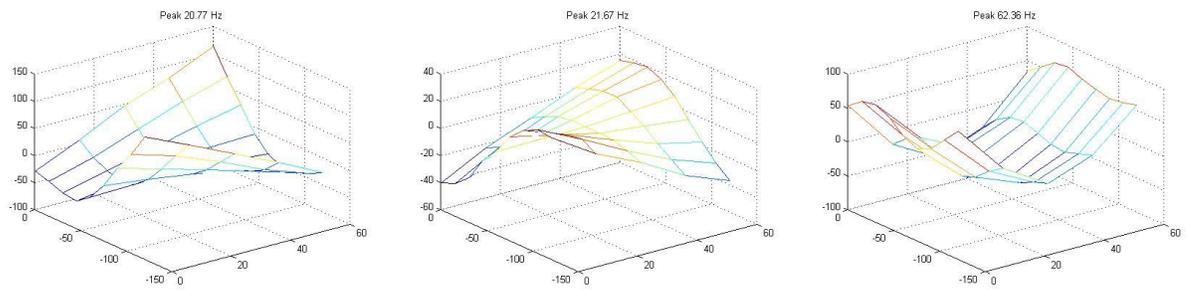
**Figura F- 17. Modos de vibrar para muestra de panel 5.1**



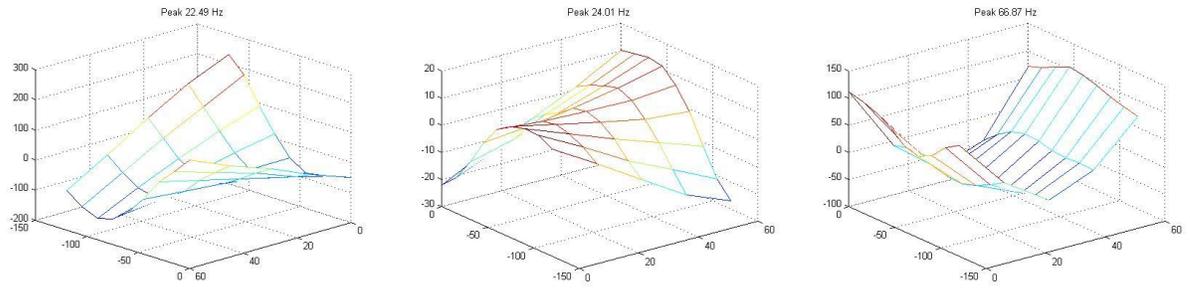
**Figura F- 18. Modos de vibrar para muestra de panel 5.2**



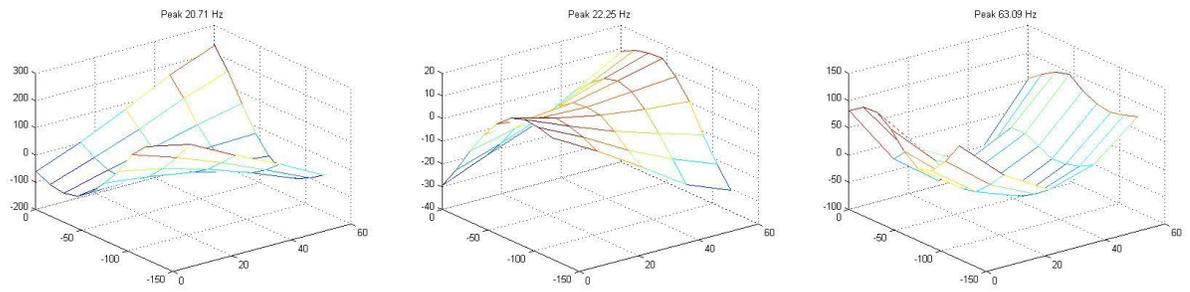
**Figura F- 19. Modos de vibrar para muestra de panel 5.3**



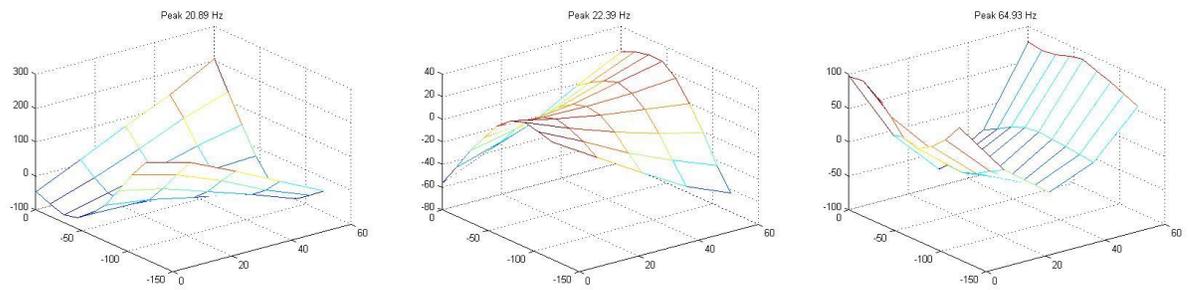
**Figura F- 20. Modos de vibrar para muestra de panel 5.4**



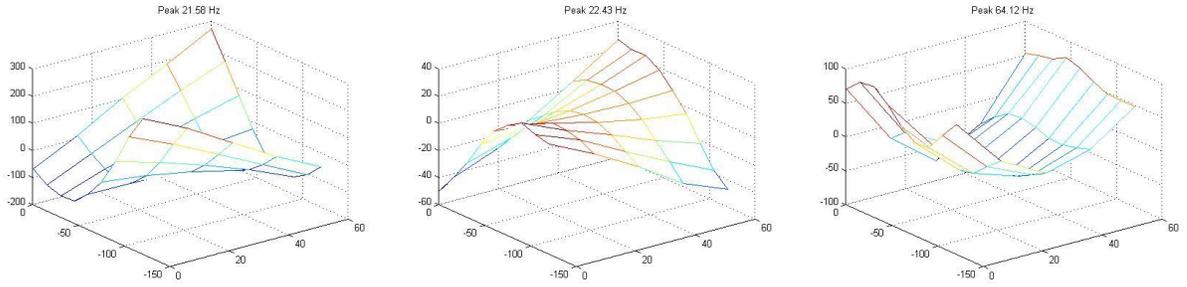
**Figura F- 21. Modos de vibrar para muestra de panel 6.1**



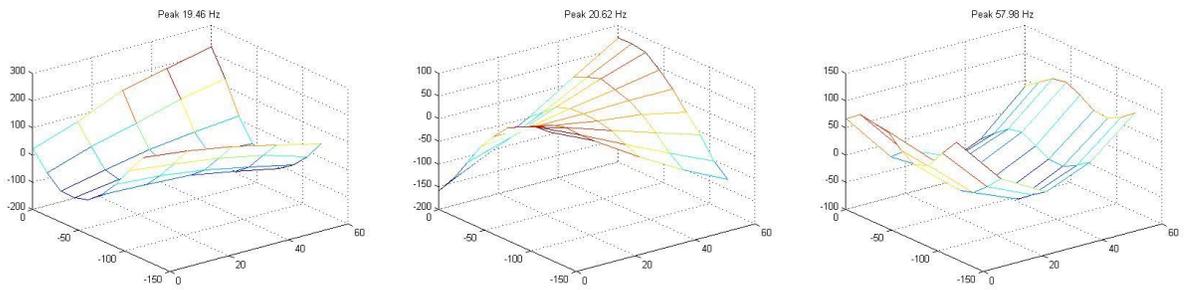
**Figura F- 22. Modos de vibrar para muestra de panel 6.2**



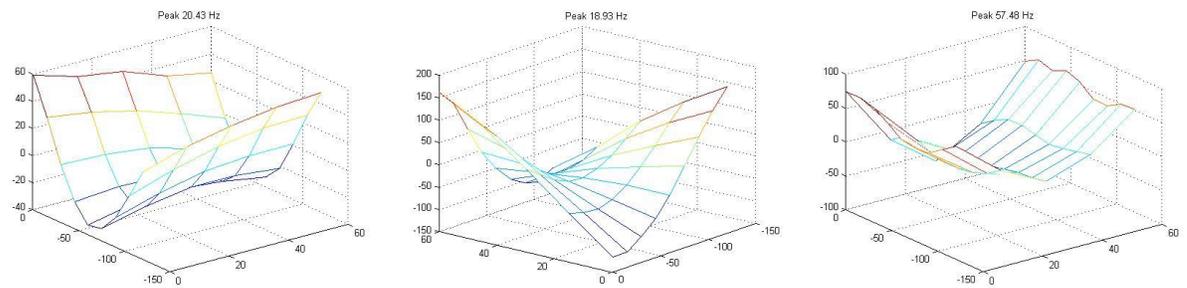
**Figura F- 23. Modos de vibrar para muestra de panel 6.3**



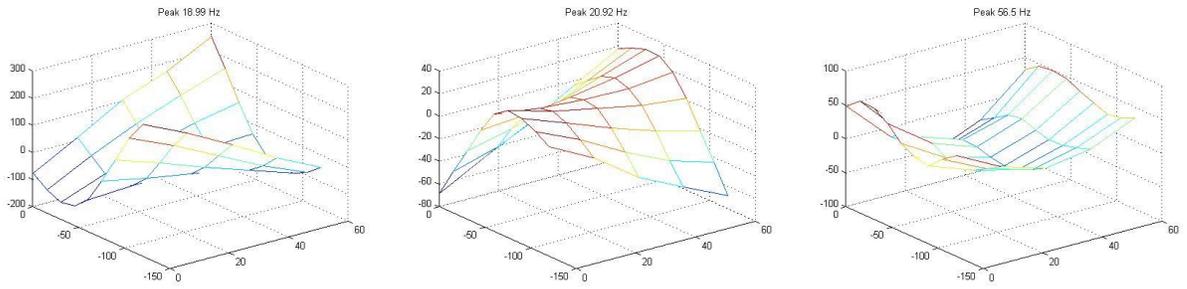
**Figura F- 24. Modos de vibrar para muestra de panel 6.4**



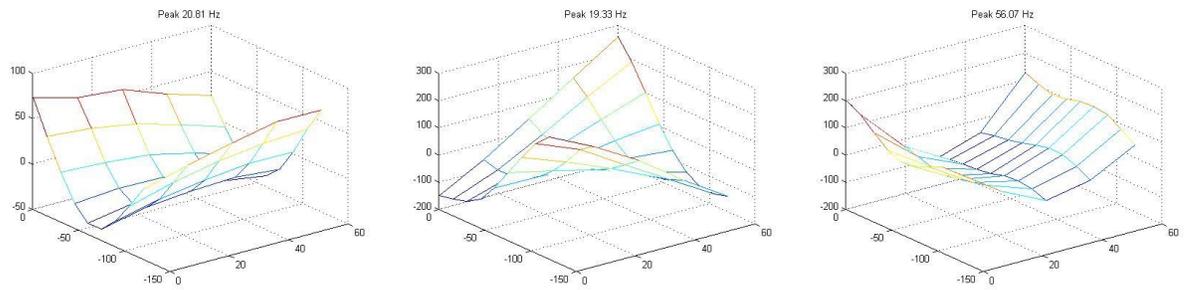
**Figura F- 25. Modos de vibrar para muestra de panel 7.1**



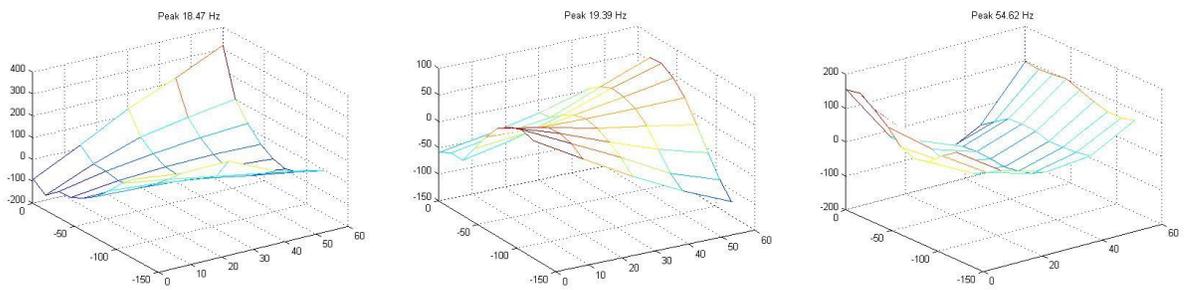
**Figura F- 26. Modos de vibrar para muestra de panel 7.2**



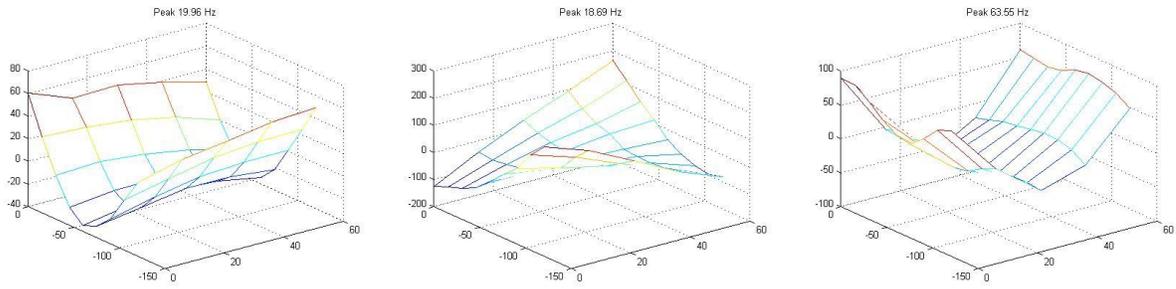
**Figura F- 27. Modos de vibrar para muestra de panel 7.3**



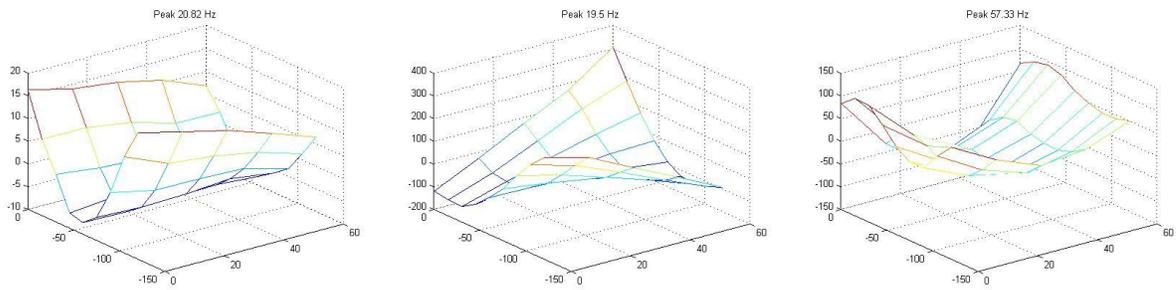
**Figura F- 28. Modos de vibrar para muestra de panel 7.4**



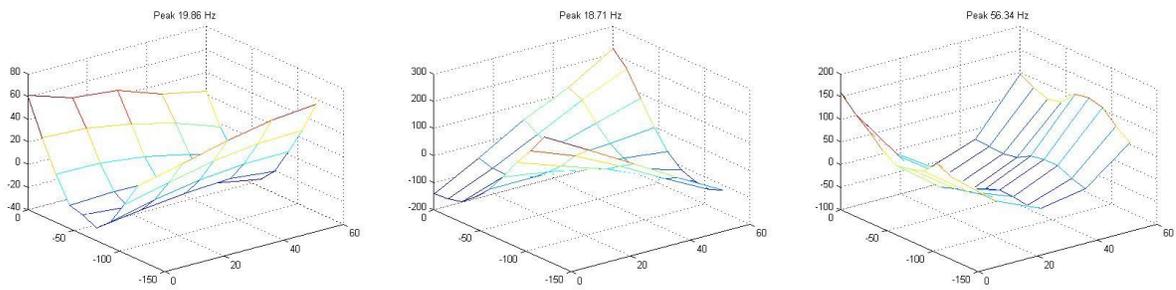
**Figura F- 29. Modos de vibrar para muestra de panel 8.1**



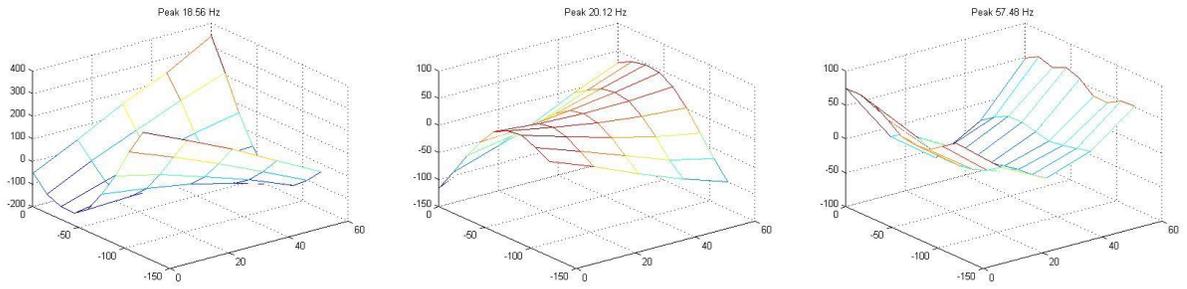
**Figura F- 30. Modos de vibrar para muestra de panel 8.2**



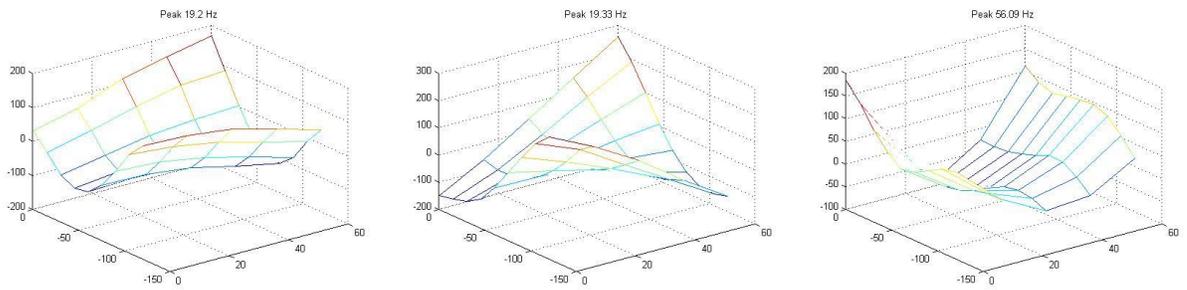
**Figura F- 31. Modos de vibrar para muestra de panel 8.3**



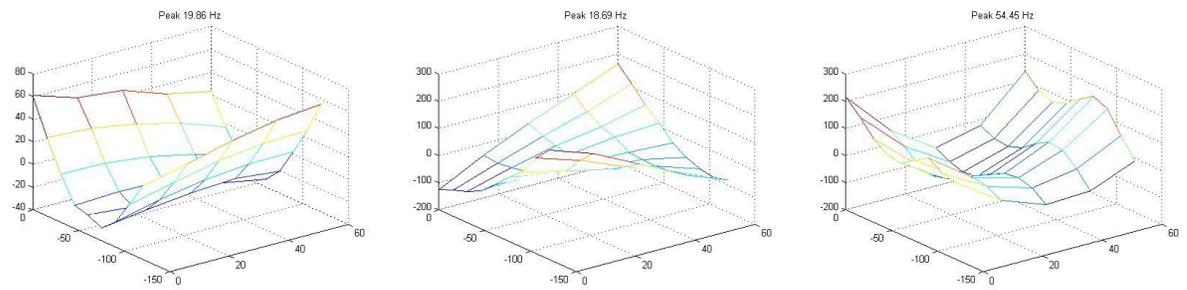
**Figura F- 32. Modos de vibrar para muestra de panel 8.4**



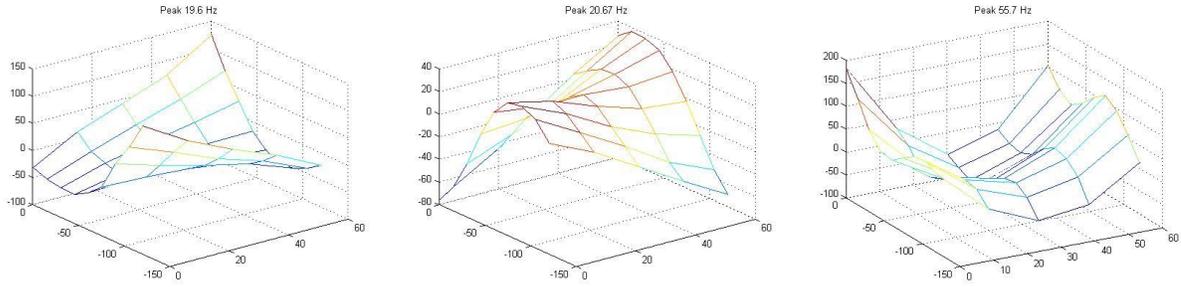
**Figura F- 33. Modos de vibrar para muestra de panel 9.1**



**Figura F- 34. Modos de vibrar para muestra de panel 9.2**



**Figura F- 35. Modos de vibrar para muestra de panel 9.3**



**Figura F- 36. Modos de vibrar para muestra de panel 9.4**