

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante : Mg.Ing. Alexander Opazo V
Profesores Comisión : Mg.Ing. Ángela Salinas B
Ing Luis Santana O

**DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD
DE MADERA PARA PANELES CLT POR METODOS
MECÁNICOS Y DINAMICOS**

PROYECTO DE TITULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD CON LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANTONIO VIDELA QUIJÓN

CONCEPCIÓN, MARZO DEL 2015

DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE MADERA PARA PANELES CLT POR MÉTODO DE VIBRACIONES TRANSVERSALES

Autor: Felipe Antonio Videla Quijón

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

Correo electrónico: fvidela@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Alexander Opazo Vega. Mg.Ing

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

Correo electrónico: aopazove@ubiobio.cl

RESUMEN

La principal técnica utilizada para la clasificación estructural de piezas de madera corresponde al ensayo mecánico a flexión de cuatro puntos que se encuentra actualmente normalizado y estandarizado, pero este ensayo al poseer maquinaria de gran dimensiones y de lento prendimiento hace la necesidad de una investigación sobre técnicas de evaluación no destructivas que sean portátiles de rápida aplicación tanto en laboratorio como en terreno.

Por lo anterior, esta investigación propuso determinar los módulos de elasticidad en madera pino radiata a través de diferentes ensayos (mecánico, vibraciones transversales, ultrasonido), realizando análisis estadísticos de sus módulos de elasticidad que permitan determinar si existen resultados similares a los métodos tradicionales (mecánico) para la selección de piezas de madera en el panel CLT. Para ello se utilizaron 137 piezas de madera pino radiata, clasificadas previamente en forma visual.

Los resultados del ensayo mecánico demostraron principalmente similitudes por el método de vibraciones trasversales(h) con un 80.4% de correlación, mientras que los valores obtenidos por los ensayos de vibraciones trasversales(b) y ultrasonido solo obtuvieron una correlación del 64.1% y 65% con respecto al ensayo mecánico.

Palabras Claves: Método Mecánico, Vibraciones Transversales, Ultrasonido, Clasificación Visual

7287 palabras texto + 22 tablas o figuras*250 + 1 figuras*500 = 13287

ABSTRACT

The main technique used for the structural classification of wood pieces corresponds to the mechanical testing flexural four (4) which is currently standardized, but this assay to possess machinery large size and slow engraftment makes the need for research on nondestructive evaluation techniques that are portable rapid application in the laboratory and in the field.

Therefore, this study aimed to determine the elastic moduli in radiate pine wood through different testing techniques (mechanical, transverse vibrations, ultrasound) performing statistical analysis of elastic moduli for determining whether similar results to those methods traditional (mechanical) for selecting pieces of wood in the CLT panel.

To do 137 pieces of radiate pine wood, previously classified visually used.

The results of mechanical testing showed similarities mainly by the method of transverse vibrations (h) with a 80.4% correlation, whereas the values obtained by transverse vibration tests (b) and ultrasound alone obtained a correlation of 64.1% and 65% with respect to mechanical testing

Keywords: Mechanical Method Transversal Vibrations, Ultrasound, Visual Classification

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	JUSTIFICACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1.	Objetivo General.....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y MARCO TEÓRICO	4
2.1.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.2.	MARCO TEÓRICO.....	6
2.2.1.	Propiedades Mecánicas de la Madera	6
2.2.2.	Paneles Contralaminados	6
2.2.3.	Módulo de Elasticidad estático y dinámico	7
2.2.4.	Grados de clasificación visual de la madera	7
2.2.5.	Ensayo método Mecánico a flexión.....	8
2.2.6.	Método de las vibraciones Transversales.....	9
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1.	MATERIALES.....	11
3.2.	METODOLOGÍA DE ENSAYO.....	12
3.2.1.	Medición de Humedad.....	13
3.2.2.	Clasificación Visual.....	14
3.2.3.	Ensayo método mecánico.....	16
3.2.4.	Ensayo Vibraciones Transversales	18
3.2.5.	Clasificación por Ultrasonido.....	23
4.	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A PIEZAS DE MADERA.....	24
4.1.	TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN ANÁLISIS GRAFICO DE CAJA.....	24
4.2.	TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	25
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27

5.1.	ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)	27
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados de módulos de elasticidad en GPa para piezas de madera.....	5
Tabla 2: Grados estructurales definidos por normativa chilena.....	15
Tabla 3: Carga máxima estimada (F.máx, est).....	16
Tabla 4: Ejemplo de secuencia de repetición	21
Tabla 5: Ejemplo error asociado al número de repeticiones.....	22
Tabla 6: Comparación tabla ANOVA ensayos de módulos de elasticidad.....	28
Tabla 7. Resumen estratigrafía tabla ANOVA entre grados estructurales.....	29
Tabla 8: Resumen comparación tabla ANOVA entre pares de grupos visuales.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología de trabajo.....	3
Figura 2: Panel Contralaminados (CLT).....	7
Figura 3: Piezas de madera para ensayos a realizar.....	11
Figura 4: Esquema descriptivo de metodología de trabajo.....	12
Figura 5: Medidor de humedad (Xilohigrómetro).....	14
Figura 6: Ejemplo piezas de madera clasificadas en forma visual.....	15
Figura 7: Ensayo mecánico.....	17
Figura 8: Ejemplo de análisis de regresión.....	18
Figura 9: Ensayo vibraciones transversales (h).....	18
Figura 10: Martillo de impacto modal y Adquisidor de datos dinámicos.....	20
Figura 11: Señal adquirida por la trasformada de Fourier (FFT).....	21
Figura 12: Señal obtenida en programa Labview.....	23
Figura 13: Medidor Fakopp Microsecond Timerel.....	24
Figura 14: Gráfica de caja resultados preliminares	25
Figura 15: Gráfica de comparación entre coeficiente de dispersión.....	67

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

En el ámbito de la construcción sustentable, unos de los principales componentes en el desarrollo de productos estructurales es la madera de pino radiata.

La gran demanda en el ámbito de la construcción por estos elementos estructurales ha determinado un rápido crecimiento en el mercado de la confección de muros de paneles contralaminados (CLT).

A su vez debido a este rápido crecimiento se ha necesitado de igual importancia la investigación de nuevos métodos de ensayos que sean, rápidos y que evalúen las propiedades mecánicas de las piezas de madera (módulo de elasticidad), con la finalidad de optimizar la resistencia del panel CLT, seleccionando las piezas con mayor módulo de elasticidad en sus extremos para las garantizar un rendimiento estructural y un nivel de calidad de los productos fabricados.

La principal técnica utilizada para la clasificación estructural de piezas de madera corresponde al ensayo mecánico a flexión de cuatro puntos que se encuentra actualmente normalizado (UNE-EN 408:20011), pero este ensayo al poseer maquinaria de gran dimensiones y de lento prendimiento hace la necesidad de una investigación sobre técnicas de evaluación no destructivas que sean portátiles de rápida aplicación tanto en laboratorio como en terreno

Por lo anterior, esta investigación propuso determinar los módulos de elasticidad en madera pino radiata a través de diferentes técnicas de ensayos(mecánico, vibraciones transversales, ultrasonido) para distintos grados estructurales por clasificación visual , realizando análisis estadísticos de sus módulos de elasticidad que permitan determinar si existen resultados similares a el método estandarizado (mecánico) y los distintos ensayos (dinámicos) para la selección de piezas de madera en el panel CLT .

1.2 Objetivos

1.2.1. *Objetivo General*

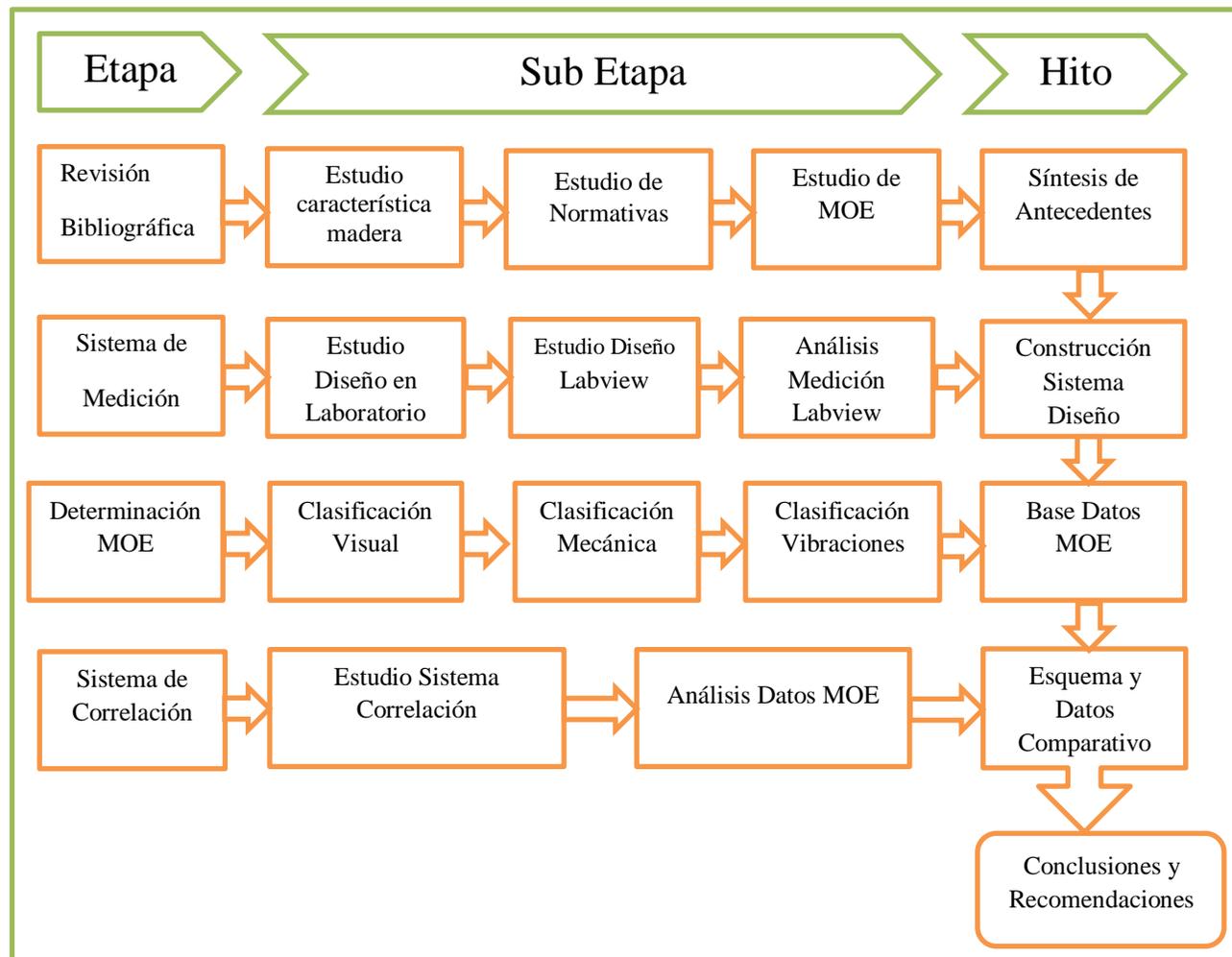
- Determinar el módulo de elasticidad de piezas de madera pino radiata a través de métodos mecánicos y dinámicos, para la creación de paneles CLT.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Resumir los antecedentes disponibles de métodos de ensayos para determinar los módulos de elasticidad de madera pino radiata.
- Determinar el grado estructural de las piezas de madera pino radiata mediante ensayo clasificación visual.
- Determinar el módulo de elasticidad a flexión de piezas de madera pino radiata a través de distintos métodos de evaluación, mecánico, vibratorio, ultrasonido e identificando eventuales diferencias significativas
- Analizar posibles correlaciones de módulo de elasticidad de ensayos de métodos mecánicos y dinámicos.

1.3. Metodología de Trabajo

En la Figura 1, se muestra esquemáticamente la metodología de trabajo utilizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1: Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consistió principalmente en cuatro etapas:

Etapa 1: Contempló como resultado una síntesis de antecedentes, en el cual se procedió al estudio de las diversas temáticas con las cuales se realizaron las diferentes técnicas de evaluación de módulos de elasticidad. Entre ellas el estudio de las características de la madera,

las diferentes normativas involucradas en los análisis, y por último el estudio del concepto de módulo de elasticidad para llegar finalmente a una síntesis de antecedentes.

Etapa 2: En esta etapa se procedió al estudio de los sistemas de medición, estos estudios se realizaron en diferentes softwares con la finalidad de determinar posteriormente en forma experimental los módulos de elasticidad de las piezas de pino radiata.

Entre estos estudios de diseño se realizaron: Estudio de diseño en laboratorio, Estudio de sistema realizado en Labview, Estudio de los análisis del software en Labview.

Etapa 3: Esta etapa contempló como se determinaron los módulos de elasticidad, lo cual se realizó a través de diferentes técnicas de clasificación, entre ellas: clasificación visual, clasificación mecánica, clasificación por vibraciones transversales. El objetivo final de esta etapa fue obtener una base de datos de módulos de elasticidad.

Etapa 4: En esta última etapa se llevó a cabo el proceso de análisis de los módulos de elasticidad, para ello se realizó un estudio de las diferentes técnicas estadísticas (Curva de correlación, normalidad de las variables, (ANOVA), con el fin de obtener una base de datos con sistemas esquemáticos y comparativos de los diferentes sistemas de medición de módulos de elasticidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y MARCO TEÓRICO

2.1. Revisión bibliográfica

Introducción

Diversos estudios relacionados con la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales, ha llevado a realizar investigaciones sobre el comportamiento de piezas de madera utilizando métodos de evaluación en forma no destructivas.

Equipos de desarrollo más recientes se basan en la inspección de las piezas mediante ondas electromagnéticas transmitidas a través de la madera (rayos x) permitiendo por ejemplo la

detección de defectos , así también la utilización de las propiedades vibratorias para determinar las propiedades elásticas de los materiales .

Frente a la innovación de estas técnicas de ensayo el profesor Ricardo M. Baettig. P. de la Universidad de Talca. (2001) Chile, impulsado por la investigación realizada por los autores Ross. R. y Pellerin R (1991) realizó un estudio sobre la determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales el año 2001. Su objetivo principal fue el diseño de 2 prototipos de métodos de determinación de módulos de elasticidad (MOE), en piezas de material isotrópico (acero) y piezas de madera de pequeñas dimensiones.

Utilizando componentes electrónicos básicos determinó la frecuencia de vibración de 5 piezas de madera pino radiata de dimensiones geométricas: longitud 1.6m, 17.8mm de espesor y 65 mm de altura.

Utilizando un sistema de apoyos simples en cada extremo de la viga y provocando en la pieza de madera una vibración libre a través de diferentes estímulos entre ellos: vibración transversal libre (IET) piezoeléctrica, vibración trasversal libre (IET) por celda de carga y ondas de esfuerzo longitudinal (LSW), se determinan su modo de elasticidad a través de ecuaciones basadas en la normativa ASTM (1999)

En la Tabla 1 se muestran los resultados del promedio de diez mediciones de MOE dinámico para cada una de las 5 piezas de madera, las cuales determinó a través de una prueba F calculada por método de aproximación de Satterthwaite con un nivel de confianza del 1% que no existían diferencias significativas entre mediciones realizadas con el mismo mecanismo, sin embargo, es altamente significativa la diferencia entre técnicas de estimación del MOE.

Tabla1: Resultados de módulos de elasticidad en GPa para piezas de madera

Técnica	Pieza Nº 1	Pieza Nº 2	Pieza Nº 3	Pieza Nº 4	Pieza Nº 5
IET Piezoeléctrica	18,9	11,2	10,5	14,6	8,5
IET Celda de carga	18,8	11,7	10,2	14,3	8,7
LSW	15,1	13,1	10,2	14,8	9

Fuente: Baettig P, R. M. (2001)

Como recomendación del estudio realizado quedó propuesta la verificación de estas técnicas con respecto a ensayos mecánicos estáticos, incrementando el tamaño de la muestra y la representatividad de las piezas estudiadas, abarcando piezas con fibra recta, con y sin defectos.

Es por ello que nuestro análisis de estudio se basó en la determinación del módulo de elasticidad por vibraciones transversales y en la comparación con métodos normativos tradicionales utilizando en gran medida los principios de análisis descritos en la publicación del señor Ricardo M. Beatiig, P, Ross. R. y Pellerin R.

La variación de la propuesta de este proyecto será determinada principalmente por la normativa utilizada, tipo de técnica de ensayo y número de piezas para ensayo.

2.2. Marco teórico.

El capítulo marco teórico consiste principalmente en abordar en forma conceptual las diferentes temáticas de estudio abordadas en el trabajo de investigación.

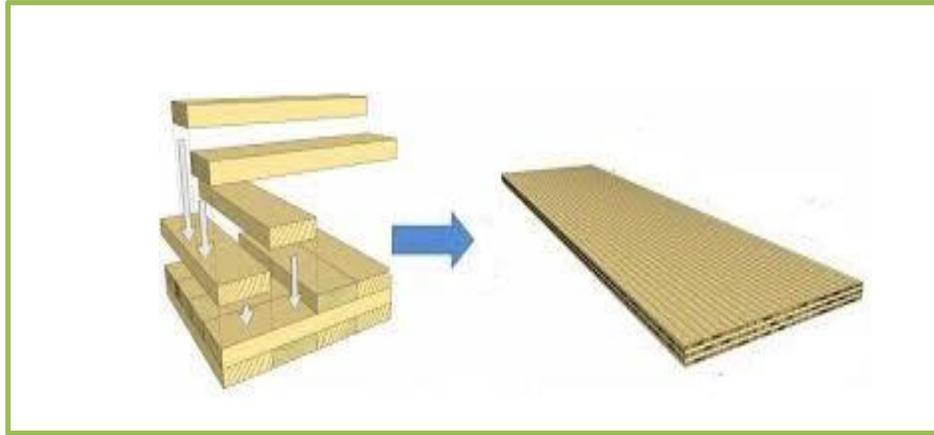
2.2.1. Propiedades Mecánicas de la Madera

Las propiedades mecánicas de la madera (módulo de elasticidad) determinan la capacidad que tiene ésta para resistir fuerzas o sollicitaciones externas, que alteren su tamaño, dimensión o que la deformen.

El conocimiento de las propiedades mecánicas de la madera se obtiene a través de la experimentación, mediante ensayos que se aplican al material y que determinan los diferentes valores de esfuerzos a los que puede estar sometida.

2.2.2. Paneles Contralaminados

Los paneles contralaminados (CLT) proveniente de la sigla en inglés Cross Laminated Timber, están constituidos por madera aserrada escalonada entre sí, unidas con clavos, poliuretano o espigas de madera de forma que la orientación de las fibras de dos capas adyacentes es perpendicular entre sí. Cada una de las tablas que componen las capas del tablero ha debido ser clasificada estructuralmente, mediante métodos visuales o métodos automatizados, previo a la construcción de los paneles CLT. En la Figura 2 se muestra la configuración constructiva típica de un panel CLT.



Fuente: Terrádez M, Á. J. (2002)

Figura 2: Panel contralaminado (CLT).

2.2.3. Módulo de Elasticidad estático y dinámico

El módulo de elasticidad de una sección de madera es una medida de resistencia a un cambio de forma o de tamaño bajo la acción de varias fuerzas en esta sección. Esta propiedad es importante para la madera con fines estructurales, debido a que bajos valores de módulos de elasticidad constituyen una importante limitación en la madera de construcción de pino radiata.

El módulo de elasticidad estático mide la resistencia de la madera a la flexión bajo cargas, éste se mide a través de un aparato que evalúe la flexión estática, registrando la flexión cuando la carga es aplicada y calculando el módulo de elasticidad (MOE).

Por otra parte el módulo de elasticidad dinámico se obtiene midiendo la velocidad de una onda acústica a través del material, de tal forma que el módulo de elasticidad dinámico queda expresado por la siguiente ecuación 1.

$$MoE_d = \rho V^2 \quad Ec \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad de la madera y V es la velocidad de la onda en tensión.

2.2.4. Grados de clasificación visual de la madera

La inspección visual es la técnica más simple y más usada de evaluación no destructiva de la madera, este método entrega solamente resultados cualitativos de calidad, mediante la cual las

piezas de madera se agrupan según su capacidad para resistir cargas o esfuerzos. Este agrupamiento proporciona al usuario la confianza de esperar un valor mínimo de resistencia para las piezas de un determinado grado estructural; cualquiera sea el origen del material cada grado se asocia con un conjunto de valores que permiten diseñar estructuras de madera en forma segura y confiable.

Los grados estructurales que establece la norma Chilena 1207 of 2005 “Clasificación Visual para uso Estructural”, son los siguientes:

- Grado estructural selecto (GS): Corresponde a piezas de gran capacidad resistente, su aplicación usual es el de elementos sometidos a grandes solicitaciones.
- Grado estructural (G1): Corresponde a piezas adecuadas para ser utilizadas en tipologías constructivas normales adecuado para envigados, pisos y entramados de techumbre.
- Grado estructural (G2): Corresponde a piezas de moderada capacidad.

2.2.5. Ensayo método Mecánico a flexión

El procedimiento de clasificación mecánica se desarrolló por la necesidad de mejorar la eficiencia que entrega la clasificación visual en la estimación de las propiedades resistentes de la madera. Este mecanismo se hizo posible cuando se verificó la existencia de una relación entre la resistencia a la flexión, compresión y tracción, y el módulo de elasticidad a flexión (E_f).

El procedimiento para la obtención de las propiedades mecánicas de madera de pino radiata consiste en medir la resistencia a la flexión producto de una carga aplicada en el centro de la luz midiendo su deformación. Esta carga aplicada se realiza en forma manual con un pistón hidráulico y la medición de la deflexión vertical se realiza con un medidor de desplazamiento instalado en el eje neutro de la sección transversal de la pieza de madera.

Este ensayo experimental se realizó acorde a la norma de ensayos UNE-EN 408 (2011), la cual especifica un método para determinar el módulo de elasticidad local a flexión. El cálculo del módulo de elasticidad en flexión se realiza con la ecuación N° 2.

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w2 - w1}{F2 - F1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad Ec. (2)$$

Donde,

$E_{m,g}$: Módulo de elasticidad mecánica global en flexión (MPa)

l : Luz de la pieza de madera entre apoyos (m)

a : Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (m)

I : Momento de inercia de la sección transversal (m^4)

$F2 - F1$: Incremento de carga (N) en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0.99 o superior.

$W2 - W1$: Incremento de deformación en milímetros correspondiente a $F2-F1$.

G : Módulo de elasticidad transversal, este debe tomarse como infinito cuando se utilice la ecuación N° (2) según la norma EN 384 (2011).

2.2.6. Método de las vibraciones Transversales

Este método de ensayo de evaluación no destructivo está diseñado para determinar la rigidez a la flexión y módulos de elasticidad (E) de propiedades de materiales a base madera, mediante vibraciones en la dirección vertical establecida en la normativa ASTM D6874 (2012)

Para determinar el módulo de elasticidad, el principal análisis que se realiza en esta técnica de ensayo es la medición del modo fundamental de vibraciones, este es un modo simple de vibración de una viga simplemente apoyada, producto de un ligero desplazamiento vertical del miembro en su extremo medio que genera una frecuencia de oscilaciones. Para llevar a cabo este sistema de ensayo se utilizaron tres elementos esenciales.

2.2.6.1. Un aparato de soporte

El sistema de apoyo proporcionó restricción vertical en los extremos de la pieza de madera, permitiendo a su vez la rotación de ésta. Si la superficie de apoyo de la muestra de ensayo no es paralela a la superficie de apoyo de las reacciones, la pieza de madera se debe acunar o emparejar para evitar un movimiento oscilatorio anormal a lo esperado en el ensayo. En este ensayo no está

permitido aplicar una sujeción lateral a las muestras inestables, si esta acción ocurriera se debe descartar la pieza

La sección voladiza del espécimen ensayado se debe colocar de tal manera que sea en igual proporción en cada soporte; un excesivo o asimétrico sistema de voladizo con respecto a los apoyos puede alterar los resultados obtenidos. Es por ello que la relación entre la longitud (l) medida entre dos apoyos (4.8 m) y la longitud real (L) de la pieza de madera (4.9 m), no debió exceder de un 98%, si esto hubiera sucedido se debería haber realizado un análisis más exigente. La sección que describe este sistema de soporte se visualiza en el anexo C.

2.2.6.2.Un sistema de excitación

Este sistema de excitación se realizó en forma manual a través de un martillo, el cual proporciona un impulso suficiente para lograr la oscilación de la pieza de madera. Esta oscilación será en forma vertical impidiendo que se produzcan componentes laterales y contacto de excitación prolongado con la muestra ensayada.

2.2.6.3.Un sistema de medición.

Como ya fue mencionado anteriormente, para determinar el módulo de elasticidad se relaciona el modo fundamental de oscilación obteniendo una frecuencia predominante de vibración relacionándola con la ecuación N° 3 que se muestra a continuación.

$$E_{tv} = \frac{(fr)^2 * w * (L)^3}{k_d * I * g} \quad Ec. (3)$$

Dónde:

E_{tv} = Módulo de elasticidad en vibración trasnversal (MPa)

fr = Frecuencia de oscilación (Hz)

w = Peso de la Muestra (N)

L = longitud real de la pieza de ensayo (m)

k_d = Constante de vibración libre de una viga simplemente apoyada

g = Aceleración debida a la gravedad (9807 mm/s²)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales.

La madera utilizada para realizar los ensayos de módulos de elasticidad se obtuvo del aporte entregado por la empresa CMPC. Este aporte consistió en ciento treinta y siete (137) piezas de madera pino radiata, que contenían diversos contenidos de humedad y sistemas de clasificación estructural.

Las piezas de madera de pino radiata que se utilizaron para determinar los módulos de elasticidad (MOE) de los ensayos mecánico, vibraciones transversales y ultrasonido poseían las siguientes dimensiones geométricas, las cuales son ideales para la conformación de paneles CLT: longitud real 4.9 m, 33mm de espesor y 145 mm de altura.

La totalidad de las piezas de madera de pino radiata entregadas por la empresa CMPC, se realizó en forma aleatoria, sin distinción inicial sobre sus características físicas y su cantidad de razón nudosa.

La Figura 3 muestra el aporte de la madera pino radiata entregado por la empresa CMPC para la realización de los ensayos.

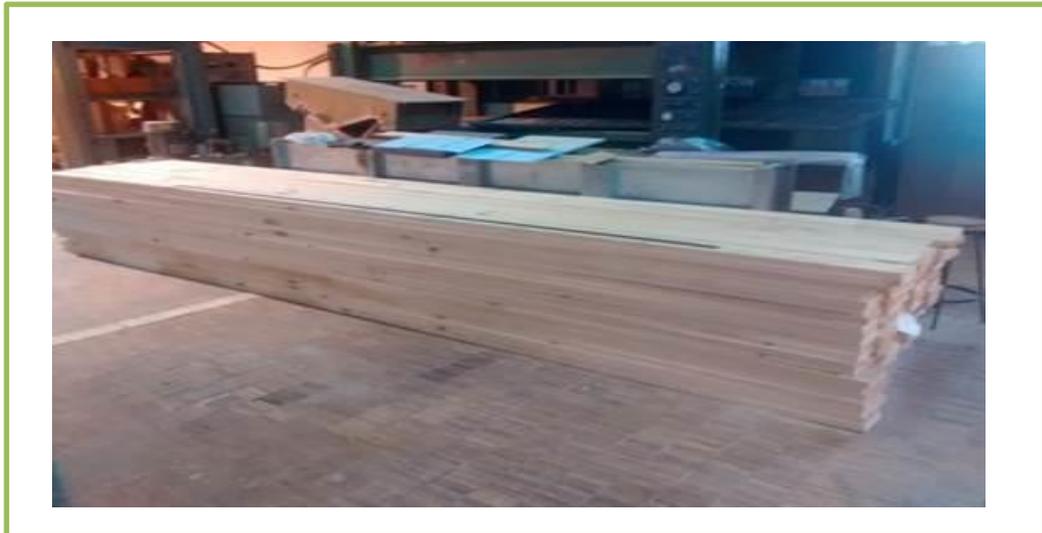
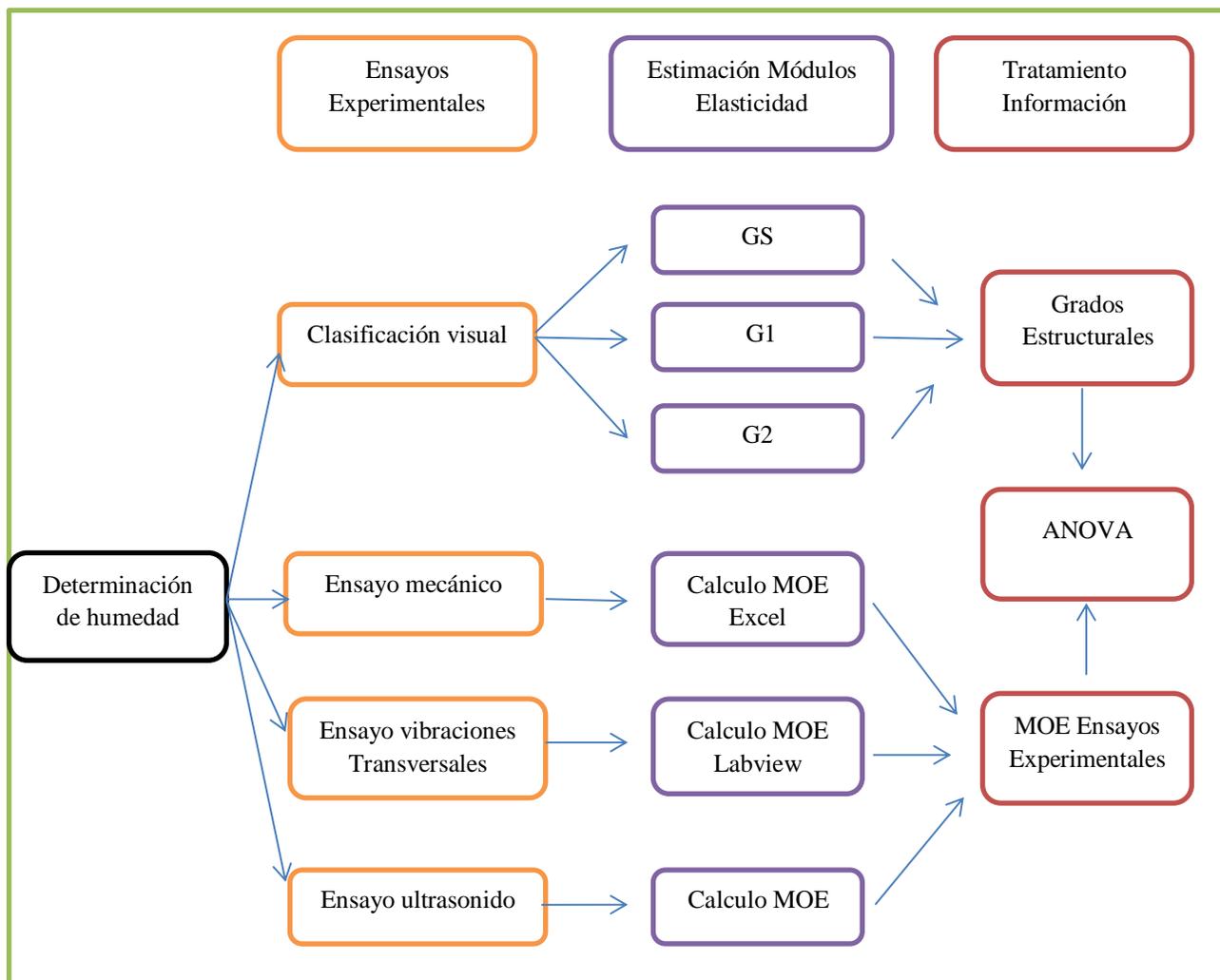


Figura 3: Piezas de madera para ensayos a realizar.

3.2. Metodología de ensayo.

Para entender la secuencia de la realización de las distintas técnicas de ensayo se muestra en el siguiente diagrama un esquema descriptivo (Figura 4), con la finalidad de explicar el procedimiento en forma secuencial.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Esquema descriptivo de metodología de trabajo

Primero: Se determinó la humedad de todas las piezas de madera pino radiata dispuestas para los ensayos: clasificación visual, mecánico, vibraciones transversales, ultrasonido.

Segundo: Luego se procedió a realizar el ensayo de clasificación visual, a través de la norma Chilena 1207 of 2005 “Clasificación Visual para uso Estructural”, este procedimiento determina tres (3) tipos de grados estructurales: grado selecto (GS), grado uno (G1), grado dos (G2) y

rechazo. Finalmente para determinar un análisis preliminar se procedió a seleccionar solo veinte (20) piezas de cada grado estructural.

Tercero: Al terminar el hito anterior se procedió a realizar el ensayo mecánico a través de la normativa española UNE-EN 408:2011+A1 (2011) “Estructura de Madera”, este procedimiento determinó el módulo de elasticidad (MOE) estático a través de la flexión. Los análisis preliminares del MOE estático se realizaron con planillas Excel confeccionadas para dichos cálculos.

Cuarto: El siguiente procedimiento determinó el módulo de elasticidad (MOE) dinámico a través del ensayo de vibraciones transversales en dos sentidos de su sección transversal, primero con respecto a su altura (h) y a continuación con respecto a su base (b), para finalmente realizar un análisis preliminar con los datos obtenidos.

Quinto: El último ensayo realizado es el de ultrasonido, este determinó en forma inmediata los módulos de elasticidad (MOE) de las piezas de pino radiata, con ello se realizó un análisis preliminar.

Sexto: Luego de haber determinado una base de datos con todos los módulos de elasticidad con respecto a las distintas técnicas de evaluación destructiva y no destructiva y sus respectivos análisis preliminares, se procedió a realizar un análisis más exhaustivo utilizando una herramienta de Excel denominada ANOVA

3.2.1. Medición de Humedad

La humedad de las piezas de madera pino radiata corresponde a la cantidad de agua que contiene expresada en un porcentaje de su masa. La madera debe presentar al momento de su utilización un contenido de humedad igual a la humedad de equilibrio del lugar donde se realizará el ensayo.

La forma práctica y rápida de medir y controlar el contenido de humedad es mediante el uso de un Xilohigrómetro dieléctrico, este instrumento posee una capacidad de medición hasta 50mm de profundidad apoyándose sobre la superficie a medir, además posee un rango de medición de 0 - 25% con un porcentaje de error $\pm 1\%$.

Para proporcionar un nivel de confianza en los ensayos realizados se procedió a medir la humedad en diferentes partes de la pieza de madera pino radiata(ambos extremos y centro), este

procedimiento se efectuó en los ensayos de clasificación visual, vibraciones trasversales y ultrasonido.

En figura 5 se muestra la manipulación del instrumento Xilohigrómetro dieléctrico en la toma de la humedad.



Fuente : Gonzales, M. (2013)

Figura 5: Medidor de humedad (Xilohigrómetro)

Para representar las humedades de equilibrio dispuestas en las localidades de Chile, se hace referencia a la tabla dispuesta en el anexo A, mencionada en la norma Chilena 1198 of 2006 “Madera - Construcciones de madera - Cálculo”.

3.2.2. Clasificación Visual

Las características de crecimiento que afectan en mayor proporción a las propiedades mecánicas de la madera son la presencia de nudosidades, bolsillos de resina e inclinación de fibra. Es por ello que este criterio de clasificación visual se basó en el riguroso control del tamaño, ubicación y frecuencia de los nudos.

Luego de haber determinado la humedad de todas las piezas de madera y haberlas examinado por ambas caras, se realizó una selección de la zona con más razón nudosa (ver definición de razón nudosa en anexo B) para proceder a evaluar en qué grado estructural pertenecen. Para ello se realizó una clasificación comparando en forma porcentual los rangos de límites admisibles, tales como se muestra en la Tabla 2.

Cabe mencionar que la realización de nuestro ensayo se basó principalmente en la normativa Chilena 1207 of 2005 pino Radiata “Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad”.

Tabla 2: Grados estructurales definidos por normativa chilena

Límite admisible para los grados Estructurales Visuales						
Grado	GS		G1		G2	
Nudos	Sin CB	con CB	Sin CB	con CB	h<=15cm	h>15cm
RANT	<= 33%	<= 20%	<= 50%	<= 33%	<=66%	<=50%
RANTB	<= 50%	<=50%	<= 50%	>50%		
RANI					<= 50%	>=33%
RANNA	No se acepta		<= 0.25		<=0.33	
Medula	No se acepta		Se acepta con restricción		Se acepta con restricción	
Inclinación Fibra	1:8		1:6		1:6	

Fuente: Moya, L (1013)

Dónde:

- RANT : Razón de área nudosa total
- RANTB : Razón de área en la zona de borde
- RANI : Razón de área nudosa individual
- RANNA : Razón de área nudosa alargado
- CB : Condición de Borde

En la Figura 6 se muestran resultados de la clasificación visual de tres imágenes de piezas de madera de pino radiata realizadas en el ensayo.



Figura 6: Ejemplo piezas de madera clasificadas en forma visual.

3.2.3. Ensayo método mecánico

Para realizar el siguiente método de ensayo, se procedió a calcular en primer lugar el parámetro de carga máxima estimada ($F_{m\acute{a}x,est.}$). Este valor se calculó a partir de la rotura en flexión de 10 piezas de madera escogidas aleatoriamente, según lo indicado en la norma UNE-EN408 (2011)

Una vez obtenido $F_{m\acute{a}x,est.}$, se procede a calcular un valor de carga que haga trabajar a las vigas en su rango elástico. Este valor corresponde al 40% de $F_{m\acute{a}x,est.}$. En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 3: Carga máxima estimada ($F_{m\acute{a}x,est.}$)

Carga máxima Aplicada		
N° Probeta	Carga	Unidad
1	15.05	KN
2	7	KN
3	26	KN
4	10.03	KN
5	4.7	KN
6	14.8	KN
7	6.6	KN
8	13.4	KN
9	3.96	KN
10	2.48	KN
Promedio rotura	10.4	KN
Carga máxima a aplicar en los ensayos	4.16	KN

Fuente: Elaboración Propia

Para realizar el sistema de medición en el ensayo de evaluación mecánica, se procedió a utilizar los siguientes materiales y equipo como se distingue en la Figura 7.

- 1) El sistema de apoyo se realizó con respecto a la normativa UNE-EN 408 (2011) descrita en el anexo A, proporcionando una luz libre de 4.8 m.
- 2) La obtención y captura de datos se obtuvo con un instrumento portátil (DATA LOGGER TC-32 K).
- 3) La aplicación de la $F_{m\acute{a}x,est.}$ se realizó con una celda de carga en el centro de la luz libre de la pieza de madera pino radiata. Esta carga se distribuyó en dos puntos simétricos a una distancia de 1350mm desde el centro de aplicación de la carga hacia ambos lados de los extremos de la pieza de madera, como se muestra en la Figura 7

- 4) Para evitar el pandeo lateral se procedió a insertar en el ensayo soportes laterales tal como se indica en la norma UNE-EN 408 (2011)
- 5) La deflexión de la pieza de madera se realizó con la inserción de dos medidores de desplazamiento, estos medidores aplicados en el eje neutro de cada lado de la pieza de ensayo.
- 6) El análisis de los datos obtenidos a partir de este ensayo mecánico se realizó a través de planillas realizadas en Microsoft Excel.

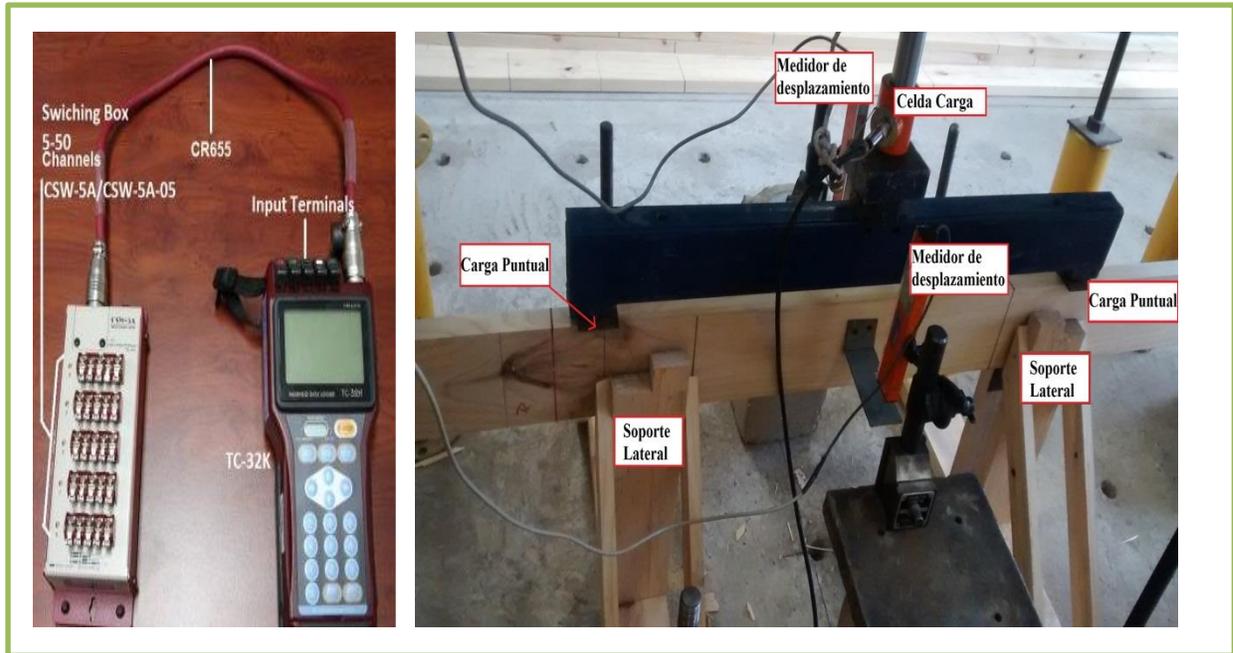


Figura 7: Ensayo mecánico.

Luego de la realización del ensayo mecánico se obtuvo una base de datos “carga v/s desplazamiento vertical ” de las piezas de madera ensayadas, con estos datos se procedió a calcular el módulo de elasticidad estático utilizando la ecuación N°2 descrita en el marco teórico.

Cabe señalar que los datos utilizados en la ecuación N° 2 para calcular el módulo de elasticidad deben estar comprendidos entre 10% y el 40% de la carga $F_{m\acute{a}x,est.}$, se espera que en este rango la curva sea lineal con un coeficiente de regresión mayor a 99%. En la Figura 8 se muestra uno de los gráficos obtenidos.

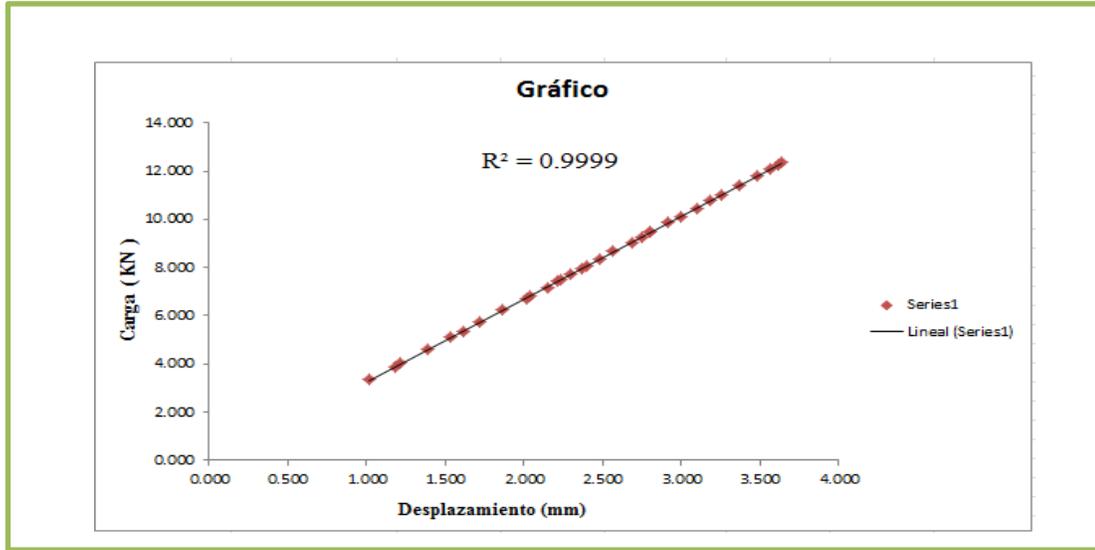


Figura 8: Ejemplo de análisis de regresión.

3.2.4. Ensayo Vibraciones Transversales

Para realizar el ensayo de vibraciones transversales se confeccionó el sistema de apoyo que se muestra en la figura 9, el cual consta de dos apoyos simples, permitiendo la rotación con respecto a su eje.

La normativa utilizada para realizar este ensayo es la ASTM D6874 (2012) “Método de prueba estándar para evaluación no destructiva de la flexión en base madera “Vibraciones transversales” descrita en el cuerpo de anexo C.



Figura 9: Ensayo vibraciones transversales (h).

Una de las partes importante durante el ensayo es la correcta inserción de los captadores de señal denominados acelerómetros, estos acelerómetros de la marca NATIONAL INSTRUMENTS poseen las siguientes características.

- Sensibilidad ($\pm 10\%$): $100\text{mV/g}(10.2 \left(\frac{\text{mV}}{\text{s}^2} \right)$
- Rango medición: $\pm 50 \text{ g } (\pm 4900 \text{ (m/s}^2\text{)})$
- Rango de frecuencia ($\pm 5\%$): 0.5 a 10.000 Hz
- Peso: 0.2 Oz (5.8 gramos)
- Resolución de banda ancha: 1 a 10.000Hz ($0.0015 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)

El sistema de sujeción de los acelerómetros a la viga de madera se realizó mediante la inserción en forma enroscada en el eje neutro de la cara de la pieza de madera en el sentido de su altura (h) y su base (b), como se muestra en la Figura 9.

A: Ensayo Vibración Transversal con respecto a su altura (A)

B: Ensayo Vibración Transversal con respecto a su base (B)

Para el sistema de análisis de los datos se requirió confeccionar un programa en un software instrumental llamado Labview. La finalidad de este código es sintetizar la señal capturada por los acelerómetros insertados en el centro de la pieza de madera pino radiata.

Dicha vibración es estimulada por un martillo de impacto modal HAMMER en el centro de la luz generando una oscilación libre en sentido transversal al impacto, este instrumento que posee las siguientes características se muestra en la Figura 11.

- Sensibilidad: ($\pm 15\%$): $10\text{mV/ lbf } (2.25\text{mV/N})$
- Rango de medición: $\pm 500 \text{ lbf } (2200\text{N})$
- Rango de frecuencia: 8 k Hz
- Masa: 0.34 lb (0.16 Kg)

Este impacto modal se realiza en el centro de la luz generando una oscilación libre en sentido transversal al impacto.



Fuente: National, I (2014)

Figura 10 Martillo de impacto modal y Adquisidor de datos dinámicos

Para poder traspasar la señal vibratoria a través de un conector y sintetizarla en un software computacional se requiere de un sistema de adquisición de datos dinámicos, este instrumento utilizado mostrado en la Figura 11 posee las siguientes características.

Marca: National Instruments

Modelo: NI cDAQ-9174

Frecuencia de Salida: 0- 20 MHz

Precisión Reloj Base: 50 ppm

A continuación se detalla la secuencia del proceso en el software Labview, la cual se mostrará en la figura C.1 del Anexo C.

- 1) Inicialmente el programa capturó veinte mil (20.000) y treinta mil (30.000) muestras de datos con una frecuencia de muestreo de 1651.7 Hz. Esto es de suma importancia porque nos asegura una toma continúa de datos durante todo el transcurso del ensayo.
- 2) Simultáneamente al capturar la señal ésta se limpió a través de un estilo de filtro Lowpass con una frecuencia de corte de 20 Hz, para eliminar entre ellos: ruido ambiental, electroestático, etc., obteniendo una señal clara y centrada en su origen.
- 3) Al obtener la señal limpia a través del filtro, se procedió a utilizar una herramienta matemática llamada transformada rápida de Fourier (FFT), con la finalidad de extraer el modo fundamental de vibración. Este procedimiento consiste en generar una nueva señal que contenga únicamente la frecuencia a extraer a partir de la vibración original.

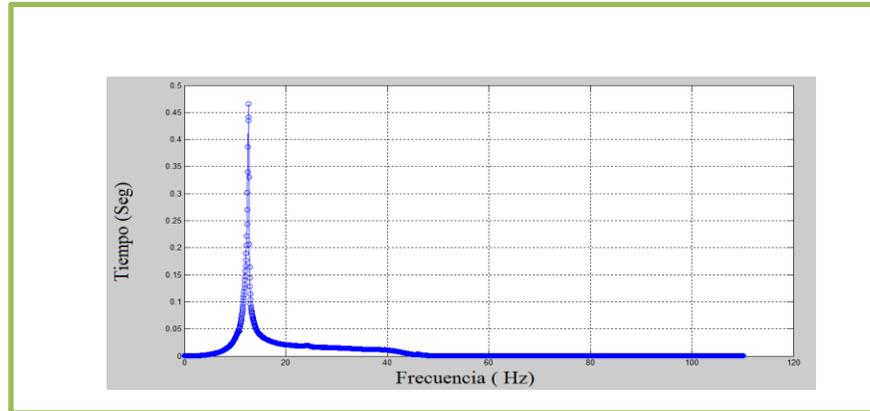


Figura 11: Señal adquirida por la FFT

Es importante considerar durante la realización del ensayo la reducción del porcentaje de error asociado al experimento, para ello se decidió realizar una obtención de frecuencias de vibración a través de quince (15) repeticiones por pieza de madera como se muestra en la Tabla 3.

A continuación en la Tabla 4 se visualiza la obtención de los resultados los cuales serán posteriormente relacionarlo con la ecuación N° 3 descrita en el cuerpo del informe (Marco teórico).

Tabla 4: Ejemplo de una secuencia de repetición realizada en el ensayo

Probeta 3h	
Medición n°	Frecuencia (Hz)
1	12.677656
2	12.674071
3	12.673548
4	12.673594
5	12.67002
6	12.671818
7	12.674457
8	12.671843
9	12.675305
10	12.672371
11	12.670602
12	12.673668
13	12.676168
14	12.671833
15	12.671312

Fuente: Elaboración Propia

Luego se procedió a realizar un análisis que contempla estadística descriptiva (coeficiente de variación) para determinar el porcentaje de error asociado al número de repeticiones mediante el ensayo de vibraciones transversales, ver Tabla 5.

Tabla 5: Ejemplo error asociado al número de repeticiones

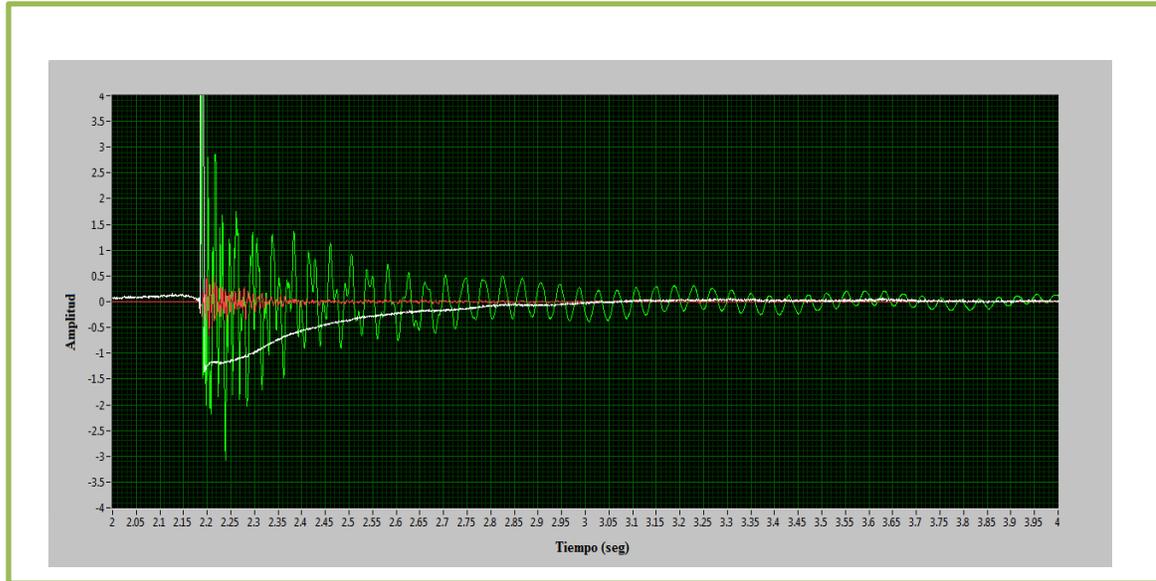
<i>Probeta 3h</i>	
Media	12.67313581
Error típico	0.000517485
Mediana	12.6729595
Desviación estándar	0.002069941
Varianza de la muestra	4.28465E-06
Cuenta	15
Nivel de confianza (95.0%)	0.001102994
Coeficiente de variación	0.016%

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 13 muestra como ejemplo el resultado de una señal oscilatoria obtenida a través del ensayo de vibraciones transversales.

En esta imagen se observa la vibración capturada por los acelerómetros insertos en la pieza de madera con la siguiente simbología de colores.

- Color verde: Correspondiente a la señal adquirida por el acelerómetro(A) de la pieza de madera cuando esta es colocada con respecto a su altura (h) para realizar el ensayo de vibraciones transversales. Como se muestra en la Figura 9.
- Color Rojo: Esta señal corresponde a la adquirida por el acelerómetro (B) donde la pieza de madera fue colocada con respecto a su base (b). Como se muestra en la Figura 9.
- Color blanco: correspondiente a la señal emitida por la fuerza de impacto que dio origen a la perturbación de la pieza de madera (martillo de impacto modal).



Fuente: Elaboración Propia

Figura 12: Señal obtenida en programa Labview.

3.2.5. Clasificación por Ultrasonido

El estudio sobre la técnica de evaluación no destructiva de ultrasonido, contempla la posibilidad de clasificar la madera para uso estructural, utilizándose para ello diferentes partidas de piezas de madera pino radiata.

El ensayo contempló un total de ciento treinta y siete (137) piezas de pino radiata de sección transversal 145mm x 33mm, estas piezas de madera fueron seleccionadas antes de su ensayo de acuerdo a la normativa Chilena 1207 of 2005 pino radiata “Clasificación Visual para uso Estructural”.

La determinación de la humedad y densidad de la pieza de madera se realizó en forma automática durante la medición del MOE ultrasonido, es por ello que el sistema de medición es de fácil manejo y medición rápida.

La medición del MOE por ultrasonido se realizó mediante el Instrumento Fakopp Microsecond Timerel mostrado en la figura 14. Este ensayo se ejecutó mediante el impacto de un martillo en el extremo de la viga produciendo una vibración en sentido longitudinal a la pieza de madera.



Figura 13: Medidor Fakopp Microsecond Timerel

Al término de la medición del MOE ultrasonido, los resultados obtenidos de todos los ensayos desarrollados se compararon de manera preliminar a través de un gráfico de caja y coeficientes de determinación, los cuales se presentan en el capítulo siguiente.

4. RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A PIEZAS DE MADERA PINO RADIATA.

4.1. Tratamiento de información Análisis grafico de caja.

Para la realización del tratamiento de la información en el gráfico de caja cabe mencionar que de la totalidad de las piezas de madera pino radiata (137) cuarenta y cinco (45) piezas fueron rechazadas por el ensayo de clasificación visual debido a defectos o razón nudosa, luego para realizar los respectivos ensayos de análisis estadísticos se escogieron en forma aleatoria 20 datos de módulos de elasticidad de los distintos grados estructurales (GS, G1, G2)

En figura 15 corresponde a un gráfico de caja en el cual se visualizó el comportamiento de las medias de los distintos módulos de elasticidad, entre las diferentes técnicas de ensayos y su respectivo grupo de clasificación visual.

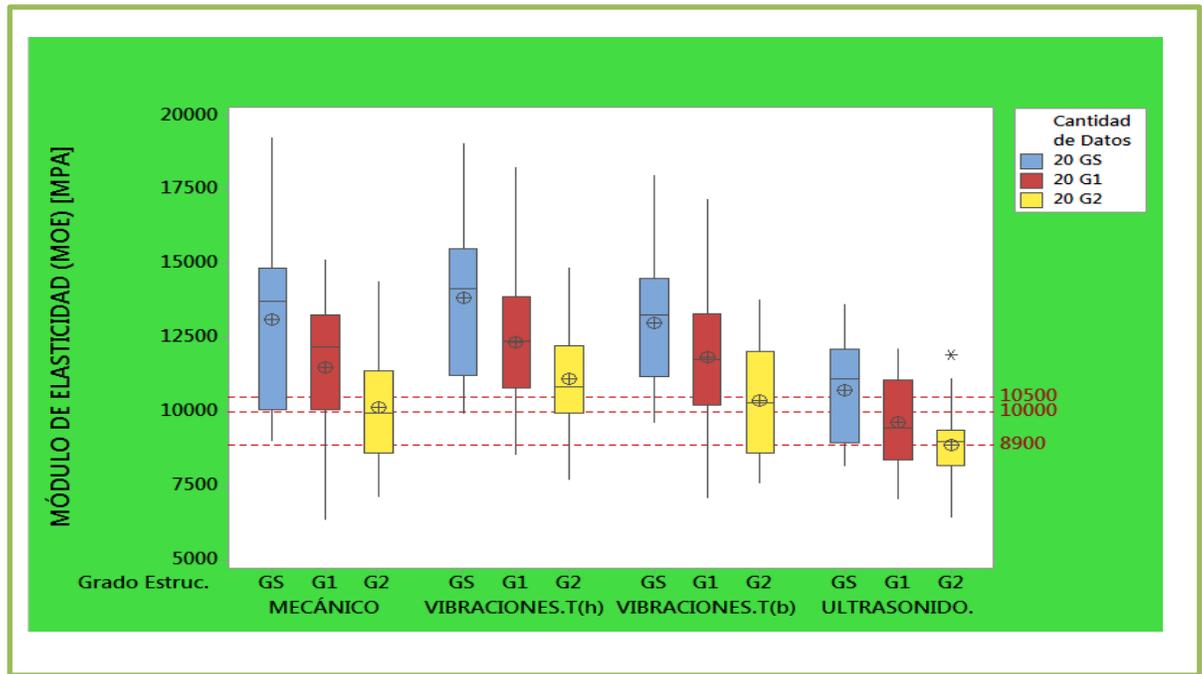


Figura 14: Gráfico de caja de los MOE según diferentes métodos.

De los resultados obtenidos en la Figura 15, se desprenden los siguientes comentarios:

1. Se pudo visualizar en la figura 15, que existieron diferencias de medias entre cada técnica de ensayos.
2. Los módulos de elasticidad estáticos referentes al método mecánico (patrón de referencia) fueron más cercanos a los módulos de elasticidad dinámicos de los ensayos por método de vibraciones transversales.
3. Los valores de los módulos de elasticidad del ensayo de ultrasonido fueron mucho más conservadores que las demás técnicas evaluadas en forma experimental encontrándose más cercanos a los valores de módulos de elasticidad descrita por la norma de clasificación visual.

4.2. Tratamiento de información Análisis de regresión.

Este método de análisis matemático basado en la estadística descriptiva contempló la relación entre variables dependientes e independientes.

Para la realización de esta fase de análisis se determinó que la variable de comparación o variable dependiente se relacionará con el módulo de elasticidad (MOE) realizado por el ensayo mecánico y la variables de prueba independientes serán los módulos de elasticidad (MOE)

realizados por los ensayos de vibraciones transversales (con respecto a la altura y al espesor de la pieza de madera) y ultrasonido.

En la Figura 16 se compararon y analizaron las tres curvas de dispersión. Como parámetro de comparación se realizó el módulo de elasticidad por ensayo mecánico, frente a los demás módulos de elasticidad de las técnicas de evaluación ya antes mencionadas.

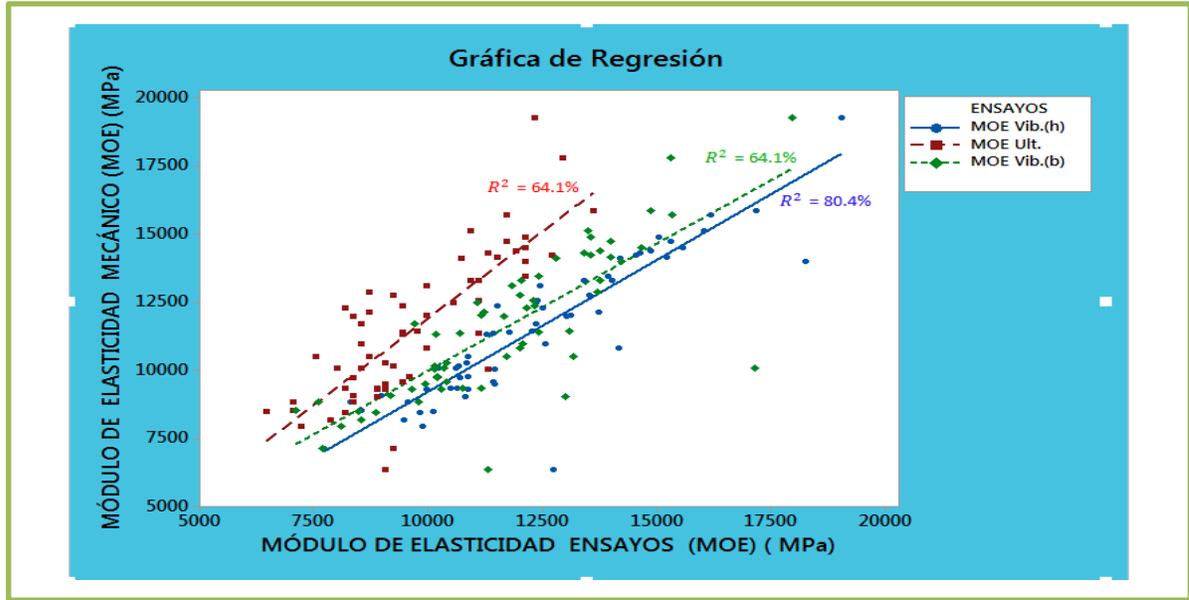


Figura 15: Gráfica de comparación entre coeficiente de dispersión.

Como muestra la figura 16 se obtuvo los siguientes resultados preliminares.

El coeficiente de regresión entre MOE mecánico v/s MOE vibraciones transversales con respecto a la altura fue de un 80.4%. Descrita por la ecuación $-430.3 + 0.965 MOE_{vibraciones.t(h)}$ que determina que existe una buena correlación entre los modelos ensayados.

El coeficiente de regresión entre MOE mecánico v/s MOE vibraciones transversales con respecto a la base (b), fue un porcentaje de 64.1%. Descrita por la ecuación $666 + 0.9305 MOE_{vibraciones.T(b)}$

El coeficiente de regresión del MOE mecánico con respecto a MOE ultrasonido fue de un 65% muy por debajo del resultado obtenido por el método mecánico, por otro modo muy similar al resultado obtenido por el ensayo de vibraciones transversales (b). Descrita por la ecuación $-821 + 1.274 MOE_{ultrasonido}$

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1. Análisis de la Varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de K poblaciones ($k > 2$) coinciden, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado.

Este contraste es fundamental en el análisis experimental debido a que nuestro principal objetivo consiste en determinar el efecto que se produce sobre algunas variables dependientes, en nuestro caso experimental sobre la técnica de evaluación del ensayo mecánico.

Para ello se utilizara como hipótesis nula (H_0) la Ecuación. (4) e hipótesis alternativa Ecuación. (5). Como se muestra a continuación. Terrádez M, Á. J. (2002)

$$H_0 = u_1 = u_2 = u_3 = u_k = u \quad \text{Ec. (4)}$$

$$H_1 = \exists u_j \neq u \quad j = 1, 2, 3 \dots k \quad \text{Ec. (5)}$$

Para realizar el análisis de ANOVA se requirió el cumplimiento de los siguientes supuestos.

1. Las poblaciones (distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor) son normales.
2. Las k muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
3. Las poblaciones tienen todas igual varianza.

La demostración en base a estadística descriptiva que determina que los módulos de elasticidad se comportaron en forma normal se demostró en el anexo D. Luego se procedió a realizar el siguiente análisis.

El primer análisis ANOVA que se realizó en este estudio fue debido a que en el gráfico de la figura 15 existían diferencias de medias entre las distintas técnicas de ensayo realizadas con respecto a su módulo de elasticidad. Es por ello que se procedió a comparar si estas diferencias de medias eran realmente significativas.

Para ello se procedió a recopilar y ordenar los datos obtenidos de veinte (20) módulos de elasticidad de cada grado estructural (GS, G1, G2) completando un total de sesenta (60) datos

de módulos de elasticidad por cada ensayo (mecánico, vibraciones transversales y ultrasonido), como se muestra en las tablas D1, D2, D3 correspondiente al anexo D.

Luego se procedió a analizar a través la aplicación ANOVA del programa Microsoft Excel, los resultados de los módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos anteriormente se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación tabla ANOVA ensayos de módulo de elasticidad

Análisis de varianza de un factor						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
MOE Ultrasonido	60	590143	9835.716667	2718768.51		
MOE Mecánico	60	706277.7448	11771.29575	6620574.1		
MOE Vibraciones(h)	60	758421.3853	12640.35642	5431754.39		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad (P_v)	Valor crítico para F
Entre grupos	247354739.8	2	123677369.9	25.1187918	2.4954E-10	3.047012139
Dentro de los grupos	871494722.9	177	4923699			
Total	1118849463	179				

- La tabla 6 muestra que existe diferencia significativa en al menos uno de los grupos debido a que:
 - I. La probabilidad P_v (2.49E-10) $\ll \alpha$ (0.05).
 - II. El parámetro de Prueba F (25.11) fue mayor que el valor crítico para F (3.04)

Se procedió a verificar si cada uno de estas técnicas de evaluación de MOE es capaz de hacer diferencias entre las categorías de clasificación visual (GS, G1, G2). Para ello se ordenaron los resultados de módulos de elasticidad obtenidos de cada ensayo, como se muestra en las Tabla D.4, D9, D14. (Ver anexo D).

Los resultados correspondientes al procedimiento anterior se observa a continuación en una tabla de resumen N° 8 cuyos valores fueron extraídos de las tablas (D.5, D10, D15 anexo D.)

Tabla 7. Resumen estratigrafía de ANOVA entre grados estructurales

Análisis de Varianza GS , G1 , G2	MOE Mecánico Tabla D5.	MOE Vibraciones(h) Tabla D10.	MOE Ultrasonido Tabla D15.
Probabilidad (Pv)	0.0084	0.009	0.0056
Valor de Prueba (F)	5.203	5.116	5.677
Valor Critico Para (F)	3.158	3.158	3.158

- De la tabla 8 se puede observar que los métodos de evaluación (mecánica, vibraciones transversales, ultrasonido) sí obtuvo diferencias entre sus categorías de clasificación visual en forma significativa. Esta diferencia se representa debido a que el parámetro de prueba F es mayor que el valor crítico F.

Debido que el análisis ANOVA solo mostró que existen diferencias significativas entre las categorías de clasificación visual medidas con el mismo método de ensayo, sin tener evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (Ho), se procedió a realizar el mismo análisis pero ahora contemplando pares de grupos de grados estructurales.

La Tabla N° 9 muestra los resultados del análisis ANOVA cuyos valores fueron extraídos de las tablas del anexo D (Tablas D6, D7, D8 “Ensayo Mecánico”), (Tablas D11,D12,D13 “Ensayo Vibraciones Transversales”), (Tablas D16,D17,D18 “Ensayo Ultrasonido”).

Tabla 8: Resumen comparación tabla ANOVA entre pares de grupos visuales.

Análisis de Varianza GS v/s G1	MOE Mecánico Tabla D6.	MOE Vibraciones (h) Tabla D11.	MOE Ultrasonido Tabla D16.
Probabilidad (Pv)	0.06	0.054	0.874
Valor de Prueba (F)	3.675	3.938	0.025
Valor Critico Para (F)	4.09	4.09	4.09

Análisis de Varianza G1 v/s G2	MOE Mecánico Tabla D7.	MOE Vibraciones (h) Tabla D12.	MOE Ultrasonido Tabla D17.
Probabilidad (Pv)	0.219	0.323	0.277
Valor de Prueba (F)	1.56	1.00	1.215
Valor Critico Para (F)	4.09	4.09	4.09

Análisis de Varianza GS v/s G2	MOE Mecánico Tabla D8.	MOE Vibraciones (h) Tabla D13.	MOE Ultrasonido Tabla D18
Probabilidad (Pv)	0.003	0.002	0.002
Valor de Prueba (F)	9.481	10.49	10.85
Valor Critico Para (F)	4.09	4.09	4.09

Como resultados de los análisis de las tablas 9 se obtuvo lo siguiente:

- Entre los pares analizados con el método de ensayo mecánico, se determinó que solo existen diferencias significativas entre Grupos GS y G2.
- Se muestra que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula (H_0) entre los grupos de clasificación visual GS y G1.
- Si bien el método de ensayo de vibraciones transversales se realizó para la pieza de madera en sus 2 ejes de simetría, (respecto a su altura (h) y respecto a su base (b)), el primer ensayo mencionado se diferenció por una mejor representación en su modo de vibrar obteniendo un coeficiente de MOE más cercano a los parámetros establecidos por la normativa de evaluación mecánica, mientras que con respecto a la pieza acostada (b) se obtuvieron parámetros de vibración anómalos que encarecieron el nivel de confiabilidad de los resultados.

Respecto a los análisis realizados con el método de ultrasonido se pudo concluir que:

- Si la pieza de madera tuviera alguno de estos defectos: rajadura en su extremo, medula central, arista faltante, etc., su módulo de elasticidad no sería acorde a los obtenidos por el ensayo mecánico.
- El ensayo no identificó evidencia suficientes para rechazar la hipótesis nula (H_0) entre los grupos de grados estructurales: GS v/s G1 y G1 v/s G2. siendo sólo capaz de identificar que existen diferencias significativas entre los grupos GS y G2.
- Si bien se pudo mostrar que los módulos de elasticidad realizados por este método de ultrasonido no representa el real módulo de elasticidad de una pieza de madera de pino radiata para algunos grados estructurales, su portabilidad y rapidez en su ejecución lo hacen superior a las demás técnicas de ensayo solo si los MOE pertenecen a los grados estructurales GS y G2.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente documento se determinó el módulo de elasticidad a través del método de vibraciones transversales para la creación de paneles CLT y compararlo con distintos métodos de ensayos tradicionales. Este se realizó utilizando 137 piezas de madera pino radiata de dimensiones: 4.9m de longitud, 124mm de altura, 33mm de espesor.

Luego de haber obtenido una base de datos de módulos de elasticidad de los distintos métodos de ensayos realizados, estos fueron analizados a través de herramientas de análisis de estadística descriptiva ANOVA. Estableciéndose las siguientes conclusiones:

- Al comparar los resultados de módulos de elasticidad de los diferentes métodos de ensayos realizados con respecto a los obtenidos en el artículo del profesor Ricardo. M. Baetiig. P, se puede concluir que dichos valores de MOE de las piezas de madera se aproximan, debido que ambos se encuentran dentro del mismo rango de valores. Sin embargo la principal diferencia de resultados es la capacidad de identificar diferencias significativas entre métodos de ensayos.
- La capacidad de interpretación de las técnicas de clasificación visual fue inferior para los grados estructurales entre G1 v/s G2 , eso se corrobora debido a que ninguno de los ensayos de evaluaciones(mecánico, vibraciones transversales, ultrasonido) pudieron obtener parámetros en base a estadística descriptiva que determinaran que entre ellos existían diferencias significativas para poder realizar su clasificación estructural.
- Los resultados de módulos de elasticidad por el ensayo mecánico (patrón de referencia) se correlaciona principalmente con respecto al método de vibraciones transversales (h), debido a que obtuvo un alto grado de correlación y gran capacidad de determinar diferencias significativas entre los grados estructurales GS V/s
- Los resultados de módulos de elasticidad obtenidos con el ensayo de ultrasonido resultaron tener una baja capacidad de identificación entre los grados estructurales solo

pudiendo diferenciar entre los grados GS V/s G2, esto es debido a su amplio rango de módulos de elasticidad que los diferencia.

Si bien se determinó en base a análisis ANOVA que el método de vibraciones transversales posee una gran capacidad de correlación con respecto al ensayo mecánico, aún cuenta con algunas recomendaciones para implementar, tales como:

- Implementar una mejora al sistema de apoyo simple analizado en la normativa D6874-12, debida que el actual posee inconveniencias al momento de determinar el modo fundamental de vibración cuando la pieza de madera se encuentra arqueada o la superficie de contacto entre el apoyo y la pieza no es simétrica, produciendo una vibración anormal al modo fundamental de vibración.
- Se propone implementar al sistema de medición de vibraciones trasversales la creación de un diseño automatizado para el sistema de soporte simple y conexión de implementos de medición de módulo de elasticidad.
- Implementar al sistema de estudio de vibraciones trasversales las variables de humedad y densidad de las piezas de maderas pino radiata, debido que en nuestro proyecto solo se realizó su medición, no incluyéndolos en los análisis efectuados.

BIBLIOGRAFÍA

- NCH 1207 (2005). Norma Chilena 1207 of 2005 " Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad ".
- AENOR. (2012). Norma Española UNE-EN-408:2011+11 “ Estructura de madera.”
- ASTM D6874. (2012). Standard Test Methods for Nondestructive Evaluation of Wood-Based Flexural Members Using Transverse Vibration. *Test*. doi:10.1520/D6874-12.2
- Baettig P, R. M. (2001). Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante Vibraciotes Transversales. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, 3(1-2), 44–51. doi:10.4067/S0718-221X2001000100005
- Grima, P., & Hall, P. (2004). Introducción a Minitab 17.
- INN. (2005). Norma Chilena 1198 of 2006 “ Madera - Construcciones en madera - Cálculo .”
- Instruments., N. (2014). NI Vibration Sensor Suite, (866), 3–6.
- Jassy, V. (2008). “ *Estudio del Comportamiento Estructural de Uniones a Escala Real de Madera Pino Radiata con Pernos de Acero , Caso Específico de Uniones de Cizalle Doble Sometidas a Compresión Axial .*”
- Marcelo, G. (2013). Bases de un sistema de certificación de madera para uso Estructural en Chile.
- Moya, L. (2013). Caracterización Estructural de Madera aserrada de pinos asociada a grados Estructurales.
- Oliveira, F. G. R., de Campos, J. A. O., Pletz, E., & Sales, A. (2002). Nondestructive Evaluation of Wood using Ultrasonic Technique. *Maderas. Ciencia y tecnología*. Bío. doi:10.4067/S0718-221X2002000200003
- Terrádez M, Á. J. (2002). Análisis De La Varianza Multivariante, (1), 1–4.
- Lin, W. (2008). FAST Fourier Transform (FFT) and Digital Filtering Using LabVIEW, 1–5.
- Instruments, N (2013) . NI cDAQ™ -9174, 1-10
- Viles, E. (2004). Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián , Universidad de Navarra Tecnun “Guía de minitab 14 .” *Test*, pp. 1–61.
- Started, G., & Edici, L. (2003). LabView “ Empezando con LabVIEW ,” *Número de parte 323427A-01* , 1– 63.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Normativas utilizadas.....	36
ANEXO B: Información clasificación visual.....	40
ANEXO C: Información vibraciones transversales.....	45
ANEXO D: Resultados finales análisis ANOVA.....	47

ANEXOS

ANEXO A

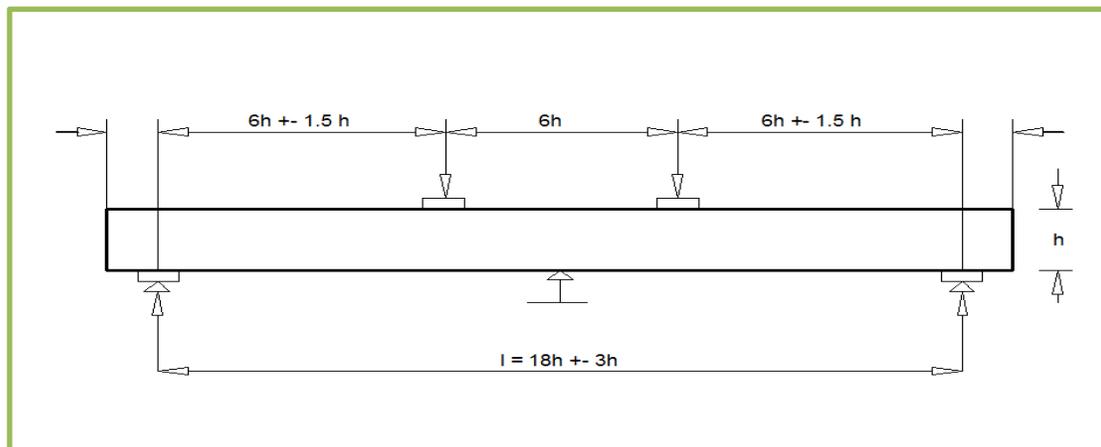
Normativas utilizadas

Norma Española UNE-EN 408:2011+A1 Estructura de madera

Esta normativa se utilizó para realizar el ensayo de evaluación mecánica, en ella se contempla los procedimientos que se deben llevar a cabo.

- La pieza de madera debe tener como mínimo una longitud de 19 veces su altura (h).
- La probeta se debe cargar en flexión sobre dos puntos simétricos a los tercios de la luz de ensayo de 18 veces la altura.
- Si la probeta o el equipo de ensayo no permiten aplicar exactamente estas condiciones, se puede modificar la distancia entre los puntos de carga y los apoyos en una longitud no mayor a 1,5 veces la altura de la pieza, siempre manteniendo una disposición simétrica.
- La carga se debe aplicar a una velocidad constante, y la carga máxima no debe superar al 40% del valor de la carga máxima estimada para el material ensayado. Esta carga máxima estimada del material ensayado se debe obtener con los resultados de 10 probetas como mínimo, de la especie, tamaño y calidad adecuadas o partiendo de datos de ensayo preexistentes adecuados.
- Debe tomarse como deformación (w) la media de las mediciones en ambas caras en el eje neutro, y debe medirse en el punto medio de un segmento de longitud igual a 5 veces la altura de la probeta (h).

Figura A.1: Esquema ensayo de Resistencia y rigidez en flexión.



Fuente: AENOR. (2012)

En la expresión de los resultados se utilizará el tramo del gráfico comprendido entre 10% Fuerza máxima estática (F.máx, est) y 40% F.máx, est. . Además en la sección del tramo se deberá dar un coeficiente de correlación de 99% o mejor. (Ver Figura 8)

Norma Chilena 1207 of 2005 Pino Radiata- Clasificación visual para uso estructural Especificaciones de los grados de calidad.

La norma chilena NCh 1207 of 2005 señala que las piezas de madera deben cumplir con los requerimientos de tolerancias dimensionales y de contenido de humedad, donde cada pieza debe presentar un contenido de humedad menor o igual al 19%

La Tabla 3. Muestra las tensiones admisibles que se asignan a las piezas clasificadas visualmente

Tabla N° A.2 Grados estructurales definidos por Nch 1207 of 2005

Grado Estructural	Tensiones Admisibles					Módulo de elasticidad en flexión E f^2	Índice de Aplastamiento en Compresión Normal Ecn/h (Mpa/mm)
	Flexión fr	Compresión paralela a la Fibra	Tracción Paralela Ftp	Compresión Normal Fcn	Cizalle Fcz		
Gs	11	8.5	6.0	2.5	1.1	10500	5.65
G1	7.5	7.5	5.0	2.5	1.1	10000	
G1 y G2	7.8	7.8	5.5	2.5	1.1	10100	
G2	6.5	6.5	4.0	2.5	1.1	8900	

Tabla A.3. Medición de la desviación de la fibra

Ubicación de la desviación de fibra		Como Medir
En la Cara	Piezas de espesor menor o igual a 50 mm	Se considera la cara con peor inclinación de fibra
	Piezas de cualquier espesor	Se considera el promedio de las inclinaciones de fibra medidas en ambas cara
En el Canto	Piezas de cualquier espesor	Se considera el promedio de las inclinaciones de ambos cantos

ASTM D6874-12 Método de prueba estándar para evaluación no destructiva de la flexión base madera- Miembro uso vibraciones transversales.

Esta normativa internacional permite la determinación de la rigidez a la flexión y módulo de elasticidad (E) de los materiales en base madera, a través de ensayos no destructivos mediante la técnica de transporte de vibraciones en sentido longitudinal a la pieza y en sentido transversal a la fuerza de impulso de la vibración.

La función principal de este método de ensayo es entregar resultados que se puedan comparar con respecto a los métodos tradicionales, permitiendo una normalización de los resultados, intercambio y correlación de datos.

Norma Chilena 1198 of 2006 madera-construcción de madera - cálculo:

Proporciona una tabla como se muestra a continuación sobre las humedades de equilibrio en localidades de Chile.

Tabla A4: Humedades de equilibrio

Ubicación de la Madera en la Vivienda	Humedad de Equilibrio Promedio
Recinto cubierto abierto	Humedad de equilibrio ver tabla 5.6 Norma Chilena 1198
Recinto cubierto cerrado sin calefacción o Calefaccionados intermitentemente	12 %
Recintos continuamente Calefaccionado	9 %

ANEXO B

Información Clasificación Visual

Para clasificar los grados estructurales se debe estimar la razón nudosa (RAN) de manera correcta, ésta razón de área nudosa consiste principalmente en que, el clasificador después de decidir la sección más débil de la pieza, debe visualizar la geometría de proyección del nudo o grupo de nudos presentes en dicho sector.

Para entender a que se denomina geometría de proyección de nudos, se establece como sección de la pieza en estudio un volumen transparente y cuerpos de nudos en su interior como material opaco. El método se aplica examinando las piezas de madera en terreno, mediante la obtención de gráficos de nudos en las secciones transversales estimadas como críticas.



Fuente: Jessy,V(2008)

Figura B.1: Proyección del nudo en el interior de la pieza

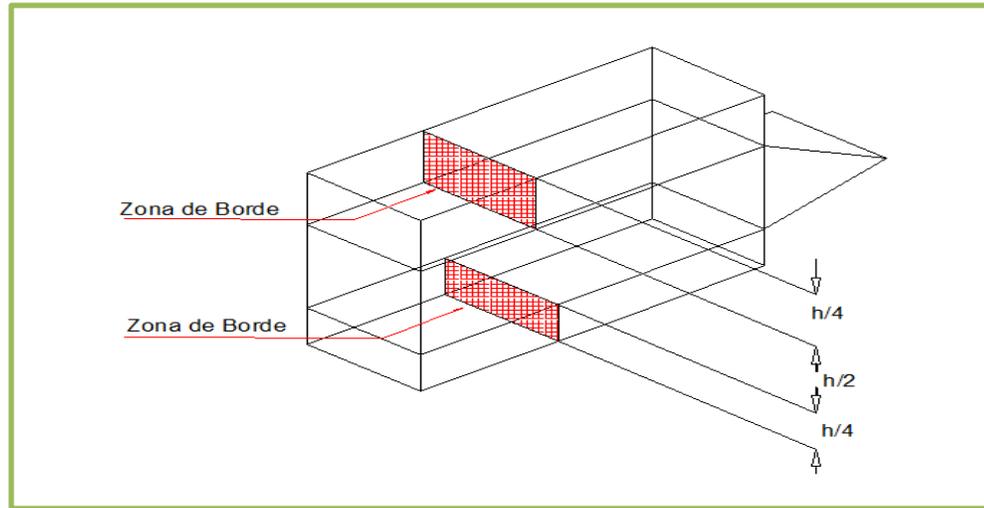
Luego del procedimiento anterior se establecen los siguientes parámetros de discretización nudosa.

Razón de Área Nudosa Total (RANT): Razón entre la suma de las áreas proyectadas, sobre la sección transversal de la pieza de todos los nudos, y el área de su sección transversal.

Razón de Área Nudosa en la Zona de Borde (RANB): Se define como la razón entre la suma de las áreas proyectadas sobre la sección transversal de todos los nudos o partes de nudos en una zona de borde, y el área de la sección transversal de la zona de borde. La zona de borde corresponde a las superficies de la sección transversal adyacentes a los cantos.

Los nudos ubicados en zonas de borde se procesan en forma más severa. Por esto, el clasificador debe preocuparse especialmente de los cuartos adyacentes al espesor de pieza (cantos).

La razón de área nudosa en las zonas de borde, se designa como RANB y en su valoración, se considera siempre el canto más desfavorable de ambos.



Fuente: Jessy,V(2008)

Figura B.2: Proyección nudo zona de borde

Razón de Área Nudosa Individual (RANI): Es la razón entre el área de proyección de un nudo individual y el área de la sección transversal de la pieza. Es decir corresponde al área que abarca el nudo de mayor tamaño del sector de análisis.

Razón de Área Nudosa de Nudo Alargado (RANNA): Razón entre el área de proyección de uno o dos nudos alargados y el área de la sección transversal de la pieza. Es decir corresponde al área abarcada por los nudos alargados en el sector de análisis.

Medición de inclinación de fibra: La inclinación de fibra se debe estimar como la desviación de la dirección de las fibras respecto al eje longitudinal de la pieza, en algunos casos es posible apreciar las fisuras superficiales de las piezas, donde la desviación de la fibra se asocia a una línea paralela a dichas fisuras. Al medir la inclinación de fibra, se debe tener presente lo detallado en la tabla C4.

Arista Faltante: Se estima como la razón entre la máxima proyección del defecto sobre la superficie transversal comprendida y el espesor o ancho completo de dicha superficie.

Esta confección sistemática de esquemas de RAN permite al clasificador tener la técnica necesaria para estimar los nudos, mediante una rápida inspección visual de las caras y cantos de las piezas a clasificar.

La figura C.1 muestra la proyección de nudos de una pieza de madera, identificando el RANT y RANB. El RANB corresponde entonces al área que abarcan los nudos en los cuartos extremos de la pieza. Se debe considerar el mayor porcentaje de área nudosa en las zonas de borde, por ejemplo en el esquema es de 53%.

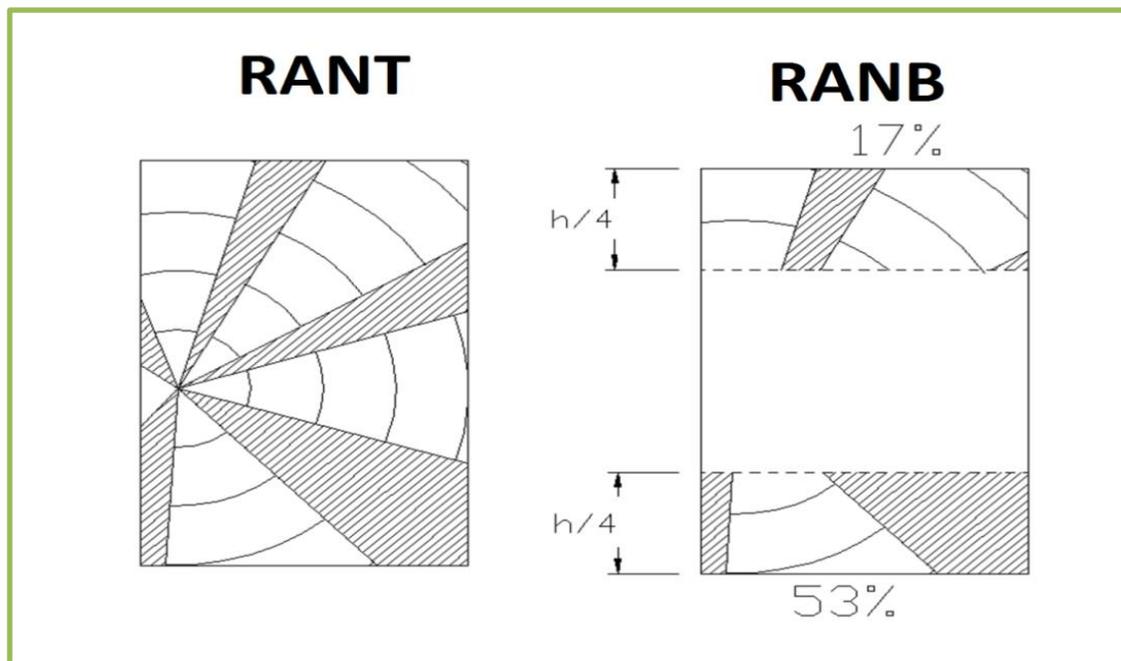


Figura B.3: Proyección de nudos pieza madera ranb.

La figura C.2, muestra la proyección de nudos de una pieza de madera, identificando el RANT y RANI. El RANI corresponde entonces al área que abarca el nudo de mayor tamaño del sector de análisis. Ejemplo para el esquema de la figura C.2 el RANI es de 41%.

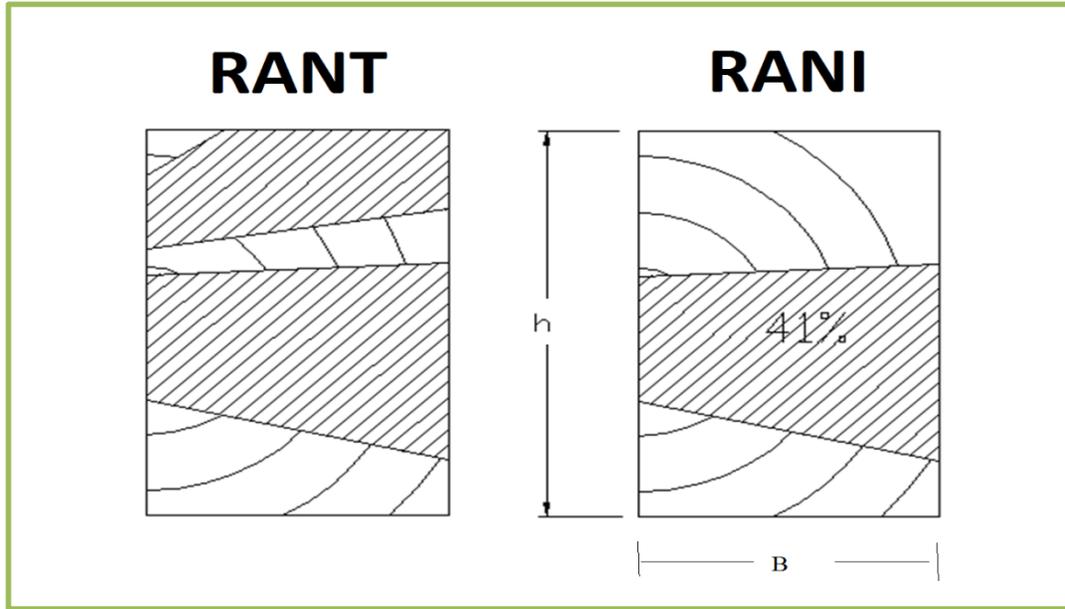


Figura B.4: proyección de nudos pieza madera rani.

La figura C.3. Muestra la proyección de nudos de una pieza de madera, identificando el RANT y RANNA. El RANNA corresponde entonces al área que abarca los nudos alargados en el sector de análisis. Por ejemplo para la figura C3 el Ranna es de 37%.

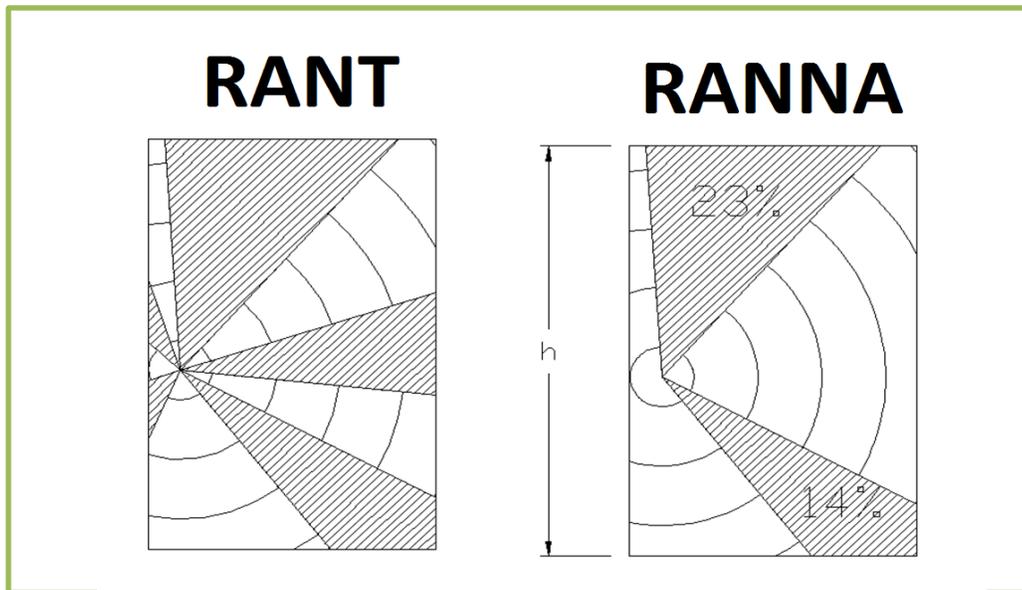


Figura B.4: Proyección nudo pieza madera Ranna.

ANEXO C

Información Vibraciones Transversales

La figura C.1 detalla la secuencia en el proceso de síntesis de datos con el del software Labview.

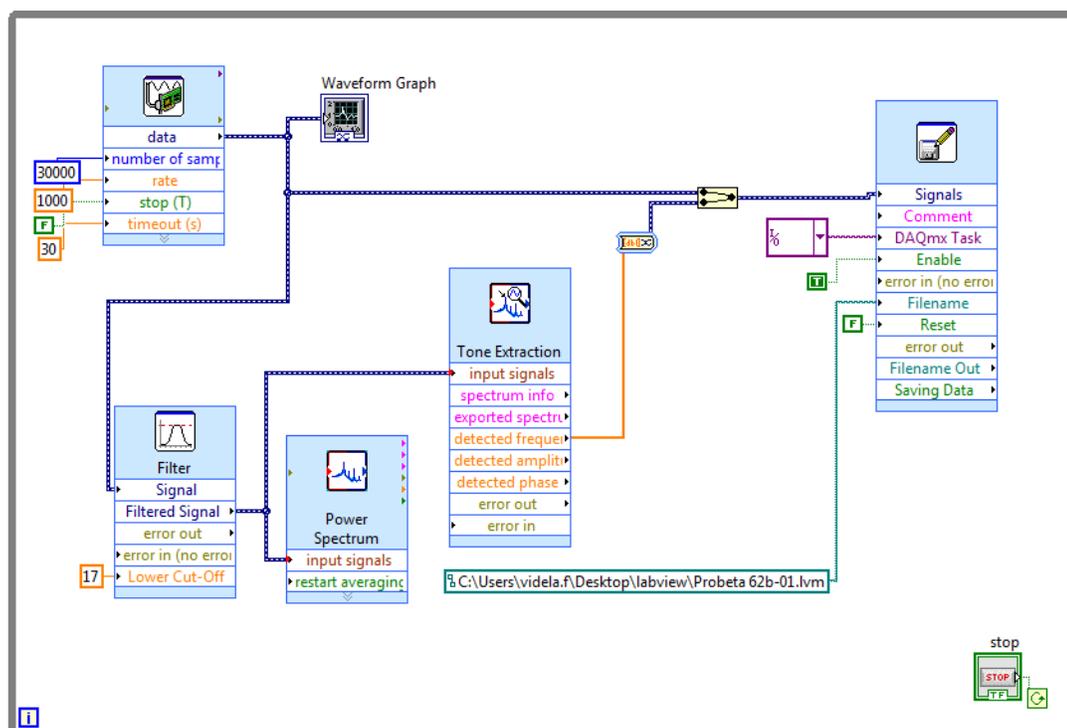


Figura C.1: Programa Labview

ANEXO D

Resultados finales análisis ANOVA

Análisis Test de Normalidad

Antes de comenzar a realizar un estudio más complejo de nuestros datos, es necesario conocer el comportamiento que tiene cada una de las variables involucradas mediante pruebas de normalidad, entre los test de normalidad utilizada se realizaron los gráficos de histograma.

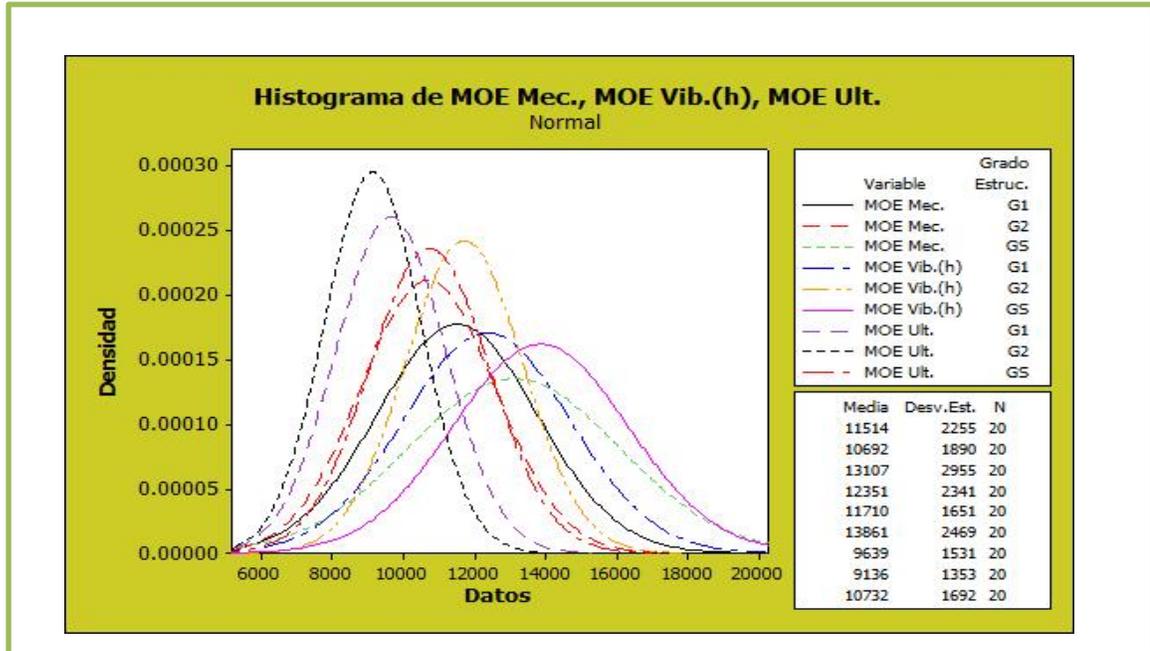


Figura D.1: Análisis test de normalidad

Se pudo determinar a partir del gráfico de histograma, que todas las variables involucradas en nuestro proyecto se comportan estadísticamente en forma normal. Esto es importante debido que al poseer una forma acampanada y simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico se pueden modelar numerosos fenómenos.

Tabla D.1: Tabla módulo de elasticidad grupo Gs

Grado Estructural	MOE Ultrasonido	MOE Mecánicos	MOE Vibraciones(h)	MOE Vibraciones(b)
GS	12343	19263	19055	11211
Gs	13606	15867	17182	13018
Gs	11714	15689	16178	9646
Gs	12945	17820	16165	13558
GS	12131	14511	15581	13573
GS	11714	14744	15314	12045
Gs	11507	14150	15214	12060
GS	12131	14887	15036	14002
Gs	11304	14294	14653	13427
GS	12728	14240	14543	14889
GS	8707	12127	13740	15338
GS	10940	13307	13428	11161
Gs	9964	12033	13128	13989
Gs	8530	10975	12572	15301
GS	9773	11422	12276	13088
GS	9585	9789	10866	10749
Gs	9068	9318	10860	10285
GS	8887	9043	10826	10197
GS	8180	9343	10640	17982
Gs	8887	9325	9954	14667

Tabla D.2. Tabla módulo de elasticidad grupo G1

Grado Estructural	MOE Ultrasonido	MOE Mecánicos	MOE Vibraciones(h)	MOE Vibraciones(b)
G1	12131	13991	18268	9180
G1	10940	15136	16037	11669
G1	10741	14101	14206	7103
G1	11101	13311	14022	10185
G1	12131	13475	13930	13765
G1	8707	12884	13693	12808
G1	8354	11973	13038	11310
G1	9068	6347	12750	9782
G1	9964	13115	12451	14237
G1	11101	12558	12394	11087
G1	10544	12505	12360	12427
G1	7536	10511	11719	11845
G1	9436	12389	11505	11505
G1	11304	10050	11454	11454
G1	9436	11340	11282	10337
G1	8530	10086	10619	13496
G1	8008	10087	10227	10146
G1	8354	8835	9546	17167
G1	8354	9058	8971	12313
G1	7047	8530	8545	12323

Tabla D.3. Tabla módulo de elasticidad grupo G2

Grado Estructural	MOE Ultrasonido	MOE Mecánicos	MOE Vibraciones(h)	MOE Vibraciones(b)
G2	10544	13770	14918	9936
G2	11921	14373	14866	10131
G2	9964	10808	14186	8111
G2	9251	12771	13527	10693
G2	11304	13196	12874	10196
G2	8180	12298	12506	10402
G2	8530	11721	12360	12026
G2	9436	11412	11775	12597
G2	9068	9490	11453	8847
G2	9436	9592	11441	12010
G2	11101	11351	11423	13174
G2	8707	10505	10865	8482
G2	9068	10258	10841	12152
G2	8354	9734	10690	12409
G2	9251	10165	10672	7606
G2	8887	9328	10490	8541
G2	6450	8504	10117	11175
G2	7208	7939	9885	137767
G2	8180	8471	9821	9705
G2	7872	8163	9484	10403

Tabla D.4 Tabla módulo de elasticidad Ensayo mecánico

Ensayo/ Grado Visual	GS	G1	G2
Moe Mecánico	19263	13991	13770
Moe Mecánico	15867	15136	14373
Moe Mecánico	15689	14101	10808
Moe Mecánico	17820	13311	12771
Moe Mecánico	14511	13475	13196
Moe Mecánico	14744	12884	12298
Moe Mecánico	14150	11973	11721
Moe Mecánico	14887	6347	11412
Moe Mecánico	14294	13115	9490
Moe Mecánico	14240	12558	9592
Moe Mecánico	12127	12505	11351
Moe Mecánico	13307	10511	10505
Moe Mecánico	12033	12389	10258
Moe Mecánico	10975	10050	9734
Moe Mecánico	11422	11340	10165
Moe Mecánico	9789	10086	9328
Moe Mecánico	9318	10087	8504
Moe Mecánico	9043	8835	7939
Moe Mecánico	9343	9058	8471
Moe Mecánico	9325	8530	8163
Valor Medio	13107.4	11514.1	10692.5

Tabla D.5 Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS, G1, G2

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
GS	20	262147.0473	13107.35237	8730753.25		
G1	20	230281.6975	11514.08488	5083044.09		
G2	20	213849	10692.45	3571024.47		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	60302257.31	2	30151128.65	5.20300909	0.00840468	3.158842719
Dentro de los grupos	330311614.5	57	5794940.605			
Total	390613871.8	59				

Tabla D.6 Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS y G1

Análisis de varianza de un factor Mecánico GS V/s G1						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
GS	20	262147.0473	13107.35237	8730753.25		
G1	20	230281.6975	11514.08488	5083044.09		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	25385012.93	1	25385012.93	3.67531278	0.06276522	4.098171731
Dentro de los grupos	262462149.5	38	6906898.672			
Total	287847162.5	39				

Tabla D.7. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales G1 y G2

Análisis de varianza de un factor Mecánico G1 V/s G2						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
G1	20	230281.698	11514.0849	5083044.09		
G2	20	213849	10692.45	3571024.47		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6750838.69	1	6750838.69	1.56015373	0.21928254	4.098171731
Dentro de los grupos	164427303	38	4327034.28			
Total	171178141	39				

Tabla D.8. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS y G2

Análisis de varianza de un factor Mecánico GS V/s G2							
RESUMEN							
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>			
GS	20	262147.047	13107.3524	8730753.25			
G2	20	213849	10692.45	3571024.47			
ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	
Entre grupos	58317534.3	1	58317534.3	9.48115559	0.00384456	4.098171731	
Dentro de los grupos	233733777	38	6150888.86				
Total	292051311	39					

Tabla D.9. Tabla módulo de elasticidad Ensayo Vibraciones (h)

Ensayo/ Grado Visual	GS	G1	G2
MOE Vibraciones(h)	19055	18268	14918
MOE Vibraciones(h)	17182	16037	14866
MOE Vibraciones(h)	16178	14206	14186
MOE Vibraciones(h)	16165	14022	13527
MOE Vibraciones(h)	15581	13930	12874
MOE Vibraciones(h)	15314	13693	12506
MOE Vibraciones(h)	15214	13038	12360
MOE Vibraciones(h)	15036	12750	11775
MOE Vibraciones(h)	14653	12451	11453
MOE Vibraciones(h)	14543	12394	11441
MOE Vibraciones(h)	13740	12360	11423
MOE Vibraciones(h)	13428	11719	10865
MOE Vibraciones(h)	13128	11505	10841
MOE Vibraciones(h)	12572	11454	10690
MOE Vibraciones(h)	12276	11282	10672
MOE Vibraciones(h)	10866	10619	10490
MOE Vibraciones(h)	10860	10227	10117
MOE Vibraciones(h)	10826	9546	9885
MOE Vibraciones(h)	10640	8971	9821
MOE Vibraciones(h)	9954	8545	9484
Numero de Probetas	20	20	20

Tabla D.10. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS,G1,G2

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
GS	20	277211.31	13860.5655	6094806.18		
G1	20	247016.345	12350.8173	5479659.22		
G2	20	234193.73	11709.6865	2725309.15		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	48777792.4	2	24388896.2	5.11663232	0.0090424	3.15884272
Dentro de los grupos	271695717	57	4766591.52			
Total	320473509	59				

Tabla D.11. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS y G1

Análisis de varianza de un factor Vibraciones GS V/s G1							
RESUMEN							
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>			
GS	20	277211.31	13860.5655	6094806.18			
G1	20	247016.345	12350.8173	5479659.22			
ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	
Entre grupos	22793397.3	1	22793397.3	3.93856589	0.05444603	4.09817173	
Dentro de los grupos	219914843	38	5787232.7				
Total	242708240	39					

Tabla D.12. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS y G1

Análisis de varianza de un factor Vibraciones G1 V/s G2							
RESUMEN							
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>			
G1	20	247016.345	12350.8173	5479659.22			
G2	20	234193.73	11709.6865	2725309.15			
ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>	
Entre grupos	4110486.58	1	4110486.58	1.00195062	0.32317069	4.09817173	
Dentro de los grupos	155894399	38	4102484.19				
Total	160004886	39					

Tabla D.13. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS y G1

Análisis de varianza de un factor Vibraciones Gs V/s G2						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
GS	20	277211.31	13860.5655	6094806.18		
G2	20	234193.73	11709.6865	2725309.15		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	46262804.7	1	46262804.7	10.4902947	0.00249407	4.09817173
Dentro de los grupos	167582191	38	4410057.66			
Total	213844996	39				

Se procede a realizar el análisis Anova con el Ensayo de evaluación de Ultrasonido.

Tabla D.14 Tabla módulo de elasticidad Ensayo Ultrasonido.

Ensayo/ Grado Visual	GS	G1	G2
MOE Ultrasonido	12343	12131	10544
MOE Ultrasonido	13606	10940	11921
MOE Ultrasonido	11714	10741	9964
MOE Ultrasonido	12945	11101	9251
MOE Ultrasonido	12131	12131	11304
MOE Ultrasonido	11714	8707	8180
MOE Ultrasonido	11507	8354	8530
MOE Ultrasonido	12131	9068	9436
MOE Ultrasonido	11304	9964	9068
MOE Ultrasonido	12728	11101	9436
MOE Ultrasonido	8707	10544	11101
MOE Ultrasonido	10940	7536	8707
MOE Ultrasonido	9964	9436	9068
MOE Ultrasonido	8530	11304	8354
MOE Ultrasonido	9773	9436	9251
MOE Ultrasonido	9585	8530	8887
MOE Ultrasonido	9068	8008	6450
MOE Ultrasonido	8887	8354	7208
MOE Ultrasonido	8180	8354	8180
MOE Ultrasonido	8887	7047	7872

Tabla D.15. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS, G1, G2

Análisis de varianza de un factor						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
GS	20	214644	10732.2	2863941.96		
G1	20	192787	9639.35	2345303.5		
G2	20	182712	9135.6	1830714.04		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	26648111.6	2	13324055.8	5.67789736	0.00564074	3.15884272
Dentro de los grupos	133759231	57	2346653.17			
Total	160407342	59				

Tabla D.16 Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS, G1

Análisis de varianza de un factor Ultra GS V/s G1						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
GS	21	429288	20442.2857	1982721801		
G1	21	385574	18360.6667	1599516691		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	45497947.5	1	45497947.5	0.02540196	0.8741716	4.08474573
Dentro de los grupos	7.1645E+10	40	1791119246			
Total	7.169E+10	41				

Tabla D.17. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales G1, G2

Análisis de varianza de un factor Ultra G1 V/s G2						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
G1	20	192787	9639.35	2345303.5		
G2	20	182712	9135.6	1830714.04		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2537640.62	1	2537640.62	1.21534002	0.27721047	4.09817173
Dentro de los grupos	79344333.4	38	2088008.77			
Total	81881974	39				

Tabla D.18. Comparación Tabla Anova entre grupos visuales GS, G2

Análisis de varianza de un factor Ultra Gs V/s G2						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
GS	20	214644	10732.2	2863941.96		
G2	20	182712	9135.6	1830714.04		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	25491315.6	1	25491315.6	10.8597161	0.00213495	4.09817173
Dentro de los grupos	89198464	38	2347328			
Total	114689780	39				