

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



“COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS DE VIBRACIONES ACÚSTICAS NO DESTRUCTIVOS Y SU CORRELACIÓN CON ENSAYOS MECÁNICOS PARA MADERA PINO PONDEROSA”

DANIELA SOLEDAD SOTO RETAMAL

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Marcelo Gonzalez Retamal

Profesor Informante

Nelson Maureira Carsalade

Concepción, Abril 2017

RESUMEN

Siempre en un proyecto se busca garantizar la funcionalidad de lo que se ejecutará. En la ingeniería civil importa asegurar la funcionalidad de la estructura, para así, evitar deformaciones excesivas y colapsos.

El comportamiento de la madera, hormigón, acero, es distinto, por eso la importancia de estudiar y analizar a fondo su comportamiento. En el caso de la madera, al existir tanta variedad se torna más complejo su análisis, más aun cuando la actual norma chilena NCh 1198 Of. 2006 basa su análisis para la determinación de grados estructurales en un ensayo destructivo, lo que conlleva a pérdidas monetarias y de tiempo.

Debido a lo mencionado anteriormente se determinaron los módulos de elasticidad dinámico a la especie maderera Pino Ponderosa mediante dos métodos basados en vibraciones acústicas, los cuales se correlacionaron con los resultados obtenidos a partir de ensayos mecánicos. Esta correlación tuvo como objetivo establecer funciones empíricas que relacionen los resultados obtenidos de ensayos de vibración con los resultados obtenidos de ensayos de flexión. Además se compararon ambos métodos de vibraciones para hallar valores representativos del módulo de elasticidad dinámico para diferentes grados estructurales de Pino Ponderosa.

ABSTRACT

In every project the goal is always to ensure the functionality of what will be executed. In civil engineering it is important to ensure the functionality of the structure, how to avoid large deformations, and the collapse.

The behavior of wood, concrete, and steel is different. Thus, the importance of thorough review and analysis of their behavior. In the case of wood, since there is so much variety, it becomes more complex to be analyzed. Besides, the current Chilean code NCh 1198 Of. 2006 bases the analysis for the determination of the structural grades in destructive tests. This leads to monetary losses and spend of time.

Due to the above identified, the dynamic elasticity modules of the ponderosa pine wood species were determined by using two methods based on acoustic vibrations. Those two methods were correlated with the results obtained from mechanical tests. This correlation had as the objective to establish empirical functions that relate the results obtained from vibration tests with the results obtained from bending tests. Additionally, the two methods based on acoustics vibrations were compared between them, to find representative values of the dynamic module of elasticity for different structural grades of Ponderosa Pine.

A mi familia

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

Sobre todas las cosas le agradezco a mi papá por darme todo en la vida, desde lo más básico hasta mis sueños más altos. Le agradezco a mi mamá por apoyarme con su compañía y alegría en los malos momentos, a mis hermanos por darme silencio cuando lo necesite, a mi tata por sus ayudas en lo que respecta a redacción, vocabulario, sinónimos/antónimos y su gran esmero por colaborar en todo ámbito de la vida.

Gracias a mi Mama Rosa y Tía Carmen por estar día a día pendiente de todo, a mi Tío Yeye que a pesar de su distancia siempre lo he sentido cerca.

La persona más cercana siempre se lleva la peor parte, con esa persona una tiende a “descargarse”, es por eso que es imposible olvidar a mi pololo Alexis. Le agradezco su apoyo, compañía, el haberme presionado para terminar mi tesis, y por estar a diario preocupado.

Mamá y Marcelito son todo para mí, no tengo palabras para definir lo importante que son, ojala siempre estemos juntos, en el último año nuestra familia se redujo mucho, pero lo importante es que seguimos siendo una pequeña familia.

A todos los que he nombrado los amo....

No puedo evitar recordar a dos grandes personas que han estado en todo momento para mí, mi amiga Jael y Fernando, incondicionales, siempre conectados y preocupados por mí. Gracias Jael por presionarme, darme consejos, animo, y creer tanto en mí.

Le agradezco al Profesor Marcelo González por su gran comprensión y al profesor Nelson Maureira por siempre tener una buena disposición.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA	1
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.5 DELIMITACIÓN.....	3
1.6 METODOLOGÍA.....	3
CAPITULO 2: MARCO TEORICO.....	5
2.1 PROPIEDADES FISICAS DE LA MADERA.....	5
2.1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD.....	5
2.1.2 DENSIDAD.....	6
2.1.3 CONTRACCIÓN.....	7
2.2 PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA.....	8
2.2.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES MECANICAS.....	8
2.2.2 CARGA, ESFUERZO, DEFORMACIÓN.....	9
2.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD, LEY DE HOOKE.....	11
2.3 ENSAYOS PARA DETERMINAR PROPIEDADES MECÁNICAS.....	12
2.3.1 FLEXIÓN ESTÁTICA.....	12
2.4 CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA.....	15
2.4.1 CLASIFICACIÓN VISUAL.....	15
2.4.2 MÉTODO MECÁNICO.....	16

2.4.3 MÉTODOS DINÁMICOS.....	17
2.5 ANTECEDENTES DEL PINO PONDEROSA.....	19
2.5.1 CARACTERISTICAS MACROSCÓPICAS.....	19
2.5.2 USOS.....	20
CAPITULO 3: METODOLOGIA.....	21
3.1 CLASIFICACIÓN VISUAL.....	21
3.2 IDENTIFICACIÓN PROBETAS.....	24
3.3 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE MADERA.....	24
3.4 MEDICIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.....	25
3.4.1 TIMBER GRADER MTG – BROOKHUIS.....	25
3.4.2 PORTABLE LUMBER GRADER DE FAKOPP ENTERPRISE.....	30
3.5 DETERMINACIÓN DE RANT Y RANB.....	34
3.6 MÓDULO DE ELASTICIDAD A FLEXIÓN ESTÁTICA Y TENSIÓN DE ROTURA A FLEXIÓN.....	36
3.7 AJUSTE PARA VALORES DE ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA.....	37
3.8 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO.....	41
3.8.1 ANALISIS DE REGRESIÓN.....	41
3.8.2 GRADOS ESTRUCTURALES A PARTIR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.....	42
CAPITULO 4: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
4.1 ERRORES ASOCIADOS.....	45
4.2 PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE MADERA.....	48
4.2.1 PROPIEDADES GEOMETRICAS.....	48

4.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS.....	49
4.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.....	49
4.3.1 EQUIPO MTG PARA GRADO ESTRUCTURAL G1.....	49
4.3.2 EQUIPO MTG PARA GRADO ESTRUCTURAL G2.....	51
4.3.3 EQUIPO PLG DE FAKOPP PARA GRADO ESTRUCTURAL G1.....	52
4.3.4 EQUIPO PLG DE FAKOPP PARA GRADO ESTRUCTURAL G2.....	54
4.4 RANT Y RANB.....	56
4.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A FLEXIÓN.....	59
4.5.1 GRADO ESTRUCTURAL G1.....	59
4.5.2 GRADO ESTRUCTURAL G2.....	60
4.6 TENSIÓN DE ROTURA A FLEXIÓN.....	62
4.6.1 GRADO ESTRUCTURAL G1.....	62
4.6.2 GRADO ESTRUCTURAL G2.....	63
4.7 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO.....	65
4.7.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.....	65
4.7.1.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G1.....	65
4.7.1.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G2.....	67
4.7.1.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G1.....	68

4.7.1.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G2.....	70
4.7.1.5 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G1.....	71
4.7.1.6 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA G2.....	73
4.7.1.7 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G1.....	84
4.7.1.8 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G2.....	76
4.7.2 ANALISIS DE REGRESIÓN MULTIPLE.....	78
4.7.2.1 MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.....	79
4.7.2.2 MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.....	81
4.7.2.3 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G1.....	82
4.7.2.4 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.....	83
4.7.2.5 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G1.....	84

4.7.2.6 TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.....	85
4.8 GRADOS ESTRUCTURALES A PARTIR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.....	87
4.8.1 EQUIPO MTG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G1.....	88
4.8.2 EQUIPO MTG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G2.....	90
4.8.3 EQUIPO PLG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G1.....	92
4.8.4 EQUIPO PLG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G2.....	93
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
CAPITULO 6: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	97
ANEXOS.....	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Forma de la curva de contracción.....	8
Figura 2.2: Diagrama esfuerzo – deformación.....	11
Figura 2.3: Viga en flexión estática.....	13
Figura 2.4: Esquema de ensayo de flexión estática.....	13
Figura 2.5: Aplicación del ensayo de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/1....	14
Figura 2.6: Fibra torcida, nudo, y bolsillo de resina l.....	16
Figura 2.7: Maquina universal de ensayos.....	17
Figura 2.8: Análisis de vibración longitudinal.....	18
Figura 2.9: Partes del tronco de un árbol.....	19
Figura 3.1: Trozas de madera Pinus Ponderosa Dougl.Ex Law. a ensayar	22
Figura 3.2: Enumeración trozas madera (Cliente-Grado estructural-N° probeta).....	24
Figura 3.3: Lugar de medición de las propiedades.....	25
Figura 3.4: Medidor Timber Grader MTG.....	26
Figura 3.5: Accesorios para instalación de software MTG.....	26
Figura 3.6: Montaje equipo MTG.....	27
Figura 3.7: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 1 de 3).....	27
Figura 3.8: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 2 de 3).....	28
Figura 3.9: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 3 de 3).....	28
Figura 3.10: Errores en medición con Timber Grader MTG.....	29
Figura 3.11: Generación ruido, imagen referencial.....	30
Figura 3.12: Monitor de balanza de equipo Fakopp.....	31
Figura 3.13: Montaje de la probeta en equipo Fakopp	31
Figura 3.14: Posicionamiento de micrófono.....	32
Figura 3.15: Ingreso de datos en software.....	33
Figura 3.16: Manera de medición de defectos en piezas de madera.....	35

Figura 3.17: Proyección de nudos sobre un plano transversal.....	36
Figura 3.18: Esquema del ensayo a flexión.....	37
Figura 3.19: Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de regresión como predictor.....	43
Figura 3.20: Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de confianza menor como predictor.....	44
Figura 4.1: Diferencia de módulo de elasticidad dinámico por equipo Fakopp en probeta S020-FE02-P039	46
Figura 4.2: Nudos muertos de probeta S020 – FE02 – P057.....	46
Figura 4.3: Nudos de gran envergadura en probetas de Gr. Estructural G2.....	47
Figura 4.4: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G1 utilizando equipo MTG.....	50
Figura 4.5: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G2 utilizando equipo MTG.....	52
Figura 4.6: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G1 utilizando equipo PLG de Fakopp.....	53
Figura 4.7: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G2 utilizando equipo PLG de Fakopp.....	54
Figura 4.8: Probetas con mayor RANT de cada grado estructural.....	56
Figura 4.9: Probetas con menor RANT de cada grado estructural.....	57
Figura 4.10: Probeta con condición de borde.....	58
Figura 4.11: Probeta sin condición de borde.....	58
Figura 4.12: Histograma del módulo de elasticidad estático a flexión con 12% de contenido de humedad para grado estructural G1.....	60
Figura 4.13: Histograma del módulo de elasticidad estático a flexión con 12% de contenido de humedad para grado estructural G2.....	61
Figura 4.14: Histograma de tensión de rotura admisible para grado estructural G1 (MPa).....	63
Figura 4.15: Histograma de tensión de rotura ajustado al 12% de C.H y 10 años de duración de carga para grado estructural G2 (MPa).....	64

Figura 4.16: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1.....	66
Figura 4.17: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2.....	68
Figura 4.18: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1.....	69
Figura 4.19: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2.....	71
Figura 4.20: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1.....	72
Figura 4.21: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2.....	74
Figura 4.22: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1.....	75
Figura 4.23: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2.....	77
Figura 4.24: Modelo de correlación entre E_d obtenido por MTG y $f_m 12\%,10$ para 66 probetas de grado estructural G1.....	89
Figura 4.25: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por MTG y $f_m 12\%,10$ para 66 probetas de grado estructural G1.....	89
Figura 4.26: Modelo de correlación entre E_d obtenido por MTG y $f_m 12\%,10$ para 66 probetas de grado estructural G2.....	90
Figura 4.27: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por MTG y $f_m 12\%,10$ para 66 probetas de grado estructural G2.....	91
Figura 4.28: Modelo de correlación entre E_d obtenido por PLG y $f_m 12\% adm$ para 66 probetas de grado estructural G1.....	92

Figura 4.29: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por PLG y $f_{m\ 12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G1.....	93
Figura 4.30: Modelo de correlación entre E_d obtenido por PLG y $f_{m\ 12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2.....	94
Figura 4.31: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por PLG y $f_{m\ 12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2.....	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Resumen de las especificaciones particulares para los grados estructurales definidos.....	23
Tabla 3.2: Límites admisibles para los grados estructurales visuales.....	34
Tabla 3.3: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para módulo de elasticidad estático en flexión.....	38
Tabla 3.4: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para tensión de rotura en flexión.....	39
Tabla 3.5: Factores K para ajustar el módulo de elasticidad aparente a las vigas simplemente apoyadas.....	39
Tabla 3.6: Factores de reducción para obtener valores admisibles.....	40
Tabla 4.1: Propiedades geométricas de probetas pino ponderosa.....	48
Tabla 4.2: Propiedades físicas de probetas pino ponderosa.....	49
Tabla 4.3: Resultados de equipo MTG para grado estructural G1.....	50
Tabla 4.4: Resultados de equipo MTG para grado estructural G2.....	51
Tabla 4.5: Resultados de equipo PLG de Fakopp para grado estructural G1.....	53
Tabla 4.6: Resultados de equipo PLG de Fakopp para grado estructural G2.....	54
Tabla 4.7: Resumen del módulo de elasticidad dinámico de ambos métodos de vibración acústica.....	55
Tabla 4.8: Resumen de resultados de RANT para diferentes grados estructurales.....	56
Tabla 4.9: Números de pieza con condición de borde para cada grado estructural.....	57
Tabla 4.10: Resultado del módulo de elasticidad estático a flexión para 66 probetas de grado estructural G1 (GPa).....	59
Tabla 4.11: Resultado del módulo de elasticidad estático a flexión para 66 probetas de grado estructural G2 (GPa).....	61
Tabla 4.12: Resultado de la tensión de rotura para 66 probetas de grado estructural G1 (MPa).....	62
Tabla 4.13: Resultado de la tensión de rotura para 66 probetas de grado estructural G2 (MPa).....	63

Tabla 4.14: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para Ef, 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G1.....	65
Tabla 4.15: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para Ef, 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G2.....	67
Tabla 4.16: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para Ef, 12%,10 y Ed utilizando el PLG para un grado estructural G1.....	69
Tabla 4.17: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para Ef, 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G2.....	70
Tabla 4.18: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G1.....	72
Tabla 4.19: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G2.....	73
Tabla 4.20: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando PLG para un grado estructural G1.....	75
Tabla 4.21: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando PLG para un grado estructural G2.....	76
Tabla 4.22: Parámetros estadísticos obtenidos por InfoStat para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.....	80
Tabla 4.23: Parámetros estadísticos obtenidos por Microsoft Excel para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.....	80
Tabla 4.24: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.....	80
Tabla 4.25: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.....	82
Tabla 4.26: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G1.....	83
Tabla 4.27: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.....	84
Tabla 4.28: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo PLG para un grado estructural G1.....	85
Tabla 4.29: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo PLG para un grado estructural G2.....	86
Tabla 4.30: Coeficientes de determinación de los análisis de regresión.....	86

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

- CH** : Contenido de humedad, en porcentaje.
- P_i** : Peso inicial, en gramos.
- P_o** : Peso anhidro, en gramos.
- PSF** : Punto de saturación de la fibra.
- ρ** : Densidad de la madera, expresada en $\frac{gr}{cm^3}$ ó $\frac{kg}{m^3}$
- m** : Masa de la madera, en gramos o kilogramos.
- V** : Volumen de la madera, en cm^3 ó m^3 .
- C** : Contracción, en porcentaje.
- D_i** : Dimensión inicial, en mm
- D_f** : Dimensión final, en mm
- σ** : Esfuerzo unitario.
- P** : Carga
- A** : Área de la sección.
- ε** : Deformación
- δ** : Deformación total
- l** : Largo del cuerpo en la dirección que actúa la fuerza
- E_d** : Módulo de elasticidad dinámico
- L** : Longitud de la probeta
- f** : Frecuencia natural de vibración longitudinal

- E** : Módulo de elasticidad en flexión
- d** : Espesor de la pieza de madera
- b** : Ancho de la pieza de madera
- $\frac{\Delta F}{\Delta e}$: Pendiente de la recta, prolongada del rango elástico de la curva carga-desplazamiento, que se forma de los datos tomados entre el 10% y el 40% de la carga máxima.
- f_m** : Resistencia en flexión
- $F_{m\acute{a}x}$** : Valor de la carga máxima.
- v_p** : Velocidad de propagación, en m/s
- $E_{f,12\%}$** : Módulo de elasticidad estático en flexión al 12% de C.H.
- E_f** : Módulo de elasticidad estático en flexión determinado experimentalmente.
- H_1** : Contenido de humedad de la probeta, en %.
- H_2** : 12% de C.H.
- B_1, B_2** : Constantes
- $f_{m,12\%}$** : Tensión de rotura en flexión al 12% de C.H.
- f_m** : Tensión de rotura en flexión determinado experimentalmente
- $E_{f,a}$** : Módulo de elasticidad en flexión aparente al 12% de contenido de humedad.
- L_1, L_2** : Distancia total entre los apoyos de la viga (luz).
- h_1, h_2** : Altura nominal de la sección transversal de la viga.
- G** : Módulo de corte.

- K_1 : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de carga que se desea atribuir su uso (tabla 3.5).
- K_2 : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de ensayo que fue medido (tabla 3.5).
- i : Número correlativo del valor.
- n : Tamaño de la muestra.
- k : Nivel de exclusión o percentil considerado.
- j : Valor ordinal j^{esimo} que excede el estimador del punto porcentual k de la muestra.
- x_j : Valor j^{esimo} de $f_{m,adm}$ que excede el estimador del punto porcentual k de la muestra.
- x_i : Observaciones individuales.
- y : Variable dependiente.
- a : Intersección.
- b : Parámetro que mide la influencia que tiene la variable explicativa sobre la variable expuesta.
- x : Variable independiente.
- σ_{XY} : Covarianza de (X,Y)
- σ_X : Desviación típica de la variable X.
- σ_Y : Desviación típica de la variable Y.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.PRESENTACIÓN DEL TEMA

La madera se ha utilizado desde tiempos inmemorables, debido a que posee buenas propiedades estructurales, siendo las principales su resistencia, dureza, rigidez y densidad. Esta última es una de las propiedades más importantes, ya que está directamente relacionada con la capacidad estructural y durabilidad.

Los métodos dinámicos o de micro vibraciones son los métodos no destructivos más antiguos que existen y tienen como fin conocer el módulo de elasticidad dinámica de la madera. Esto se logra midiendo la frecuencia natural de vibración de una pieza de dimensiones y densidad conocida. En este estudio se usó el *Pinus ponderosa Dougl, Ex Laws* (Pino Ponderosa), el cual es originario del Nor-Oeste de los Estados Unidos. Corresponde a la especie más plantada en la Región de Aysén, donde existen más de 25 mil hectáreas, correspondiente al 90% de las plantaciones de esta especie en Chile. Además es una especie de rápido crecimiento, por lo que son buenas alternativas para el desarrollo comercial de plantaciones, recuperación de terrenos deforestados y bajo erosión.

El instituto forestal (INFOR) ha presentado estudios que favorecen el uso industrial del Pino Ponderosa de Aysén. Dichos estudios partieron el año 2011 en donde se comenzó por determinar las propiedades de la especie antes mencionada.

El presente proyecto propone determinar las propiedades mecánicas entregadas por los ensayos de flexión (conforme a la NCh 3028/1 Of. 2006). Además se busca obtener los módulos de elasticidad dinámico por medio de 2 instrumentos basados en vibraciones acústicas: Fakopp y MTG. Con esto finalmente determinar si existe correlación con los resultados obtenidos en flexión. Esto por medio de un análisis estadístico cuya finalidad es hallar la relación entre los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos para finalmente establecer una condición de equivalencia entre ambos. Se realizó una comparación entre los dos métodos de vibración acústica para determinar cuál entrega resultados más confiables y bajo qué condiciones se recomienda un método u otro.

Es importante destacar que este proyecto ha sido posible gracias a la completa colaboración (monetaria e infraestructura) del Instituto Forestal (INFOR) ubicado camino a Coronel, el cual ha proporcionado todos los materiales a ensayar, y equipos a utilizados.

1.2.OBJETIVO GENERAL

Determinar el módulo de elasticidad dinámico de la especie *Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws* mediante dos métodos basados en vibraciones acústicas (Fakop y MTG) y correlacionarlos con resultados obtenidos a partir de ensayos mecánicos (Flexión estándar).

1.3.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener información estadísticamente robusta que represente las propiedades mecánicas de los especímenes basados en ensayos de flexión estándar y mediante dos métodos basados en vibraciones (Fakop y MTG).
- Establecer las funciones empíricas que relacionan los resultados obtenidos de los ensayos basados en vibraciones con los resultados obtenidos a partir de ensayos estándar de flexión.
- Establecer valores representativos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales G1 y G2 del pino ponderosa de Aysén.
- Comparar los resultados de los dos métodos de vibraciones, para poder definir cuál es más confiable o bajo qué condiciones es mejor la utilización de uno u el otro.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Gran parte de la madera utilizada en la construcción en Chile es de pino radiata, la cual generalmente proviene de la zona central del país. Esto hace que el costo de las construcciones de madera en la Región de Aysén sea elevado, debido al costo adicional del transporte de esta materia prima. Por esto surge la necesidad de comprobar que la madera producida en la zona de Aysén (Pino ponderosa) puede ser usada en desmedro del pino radiata.

Se busca realizar esta comprobación de forma eficiente y económica, por medio de una clasificación estructural basada en ensayos de vibración acústica no destructivos

(Fakopp y Brookhuis MTG), correlacionados con los métodos mecánicos. Así, las empresas forestales podrían realizar la clasificación estructural por medio de un ensayo dinámico económico, sencillo y rápido de ejecutar.

1.5.DELIMITACIÓN

El estudio se realizó para un total de 140 probetas de *Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws*. La mitad de ellas correspondían a probetas con un grado estructural G1 y las restantes a un grado estructural G2. Esto según clasificación visual realizada por un especialista de INFOR de acuerdo a la NCh 1207 Of. 2005. Todas las probetas se encontraban estandarizadas, de escuadría 41x90 mm, teniendo un largo promedio de 3.2 m. Las probetas fueron secadas artificialmente, obteniéndose una humedad promedio del 12%.

La actual norma chilena NCh 1198 Of. 2014 utiliza para la determinación de grados estructurales los parámetros del módulo de elasticidad estático a flexión y tensión de rotura en flexión. Debido a esto, se realizaron dos ensayos dinámicos de vibraciones y sólo el ensayo mecánico de flexión.

1.6.METODOLOGÍA

A un total de 140 trozas de *Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws*, se les determinó el grado estructural por medio de una clasificación visual. Previo a esto se registraron sus dimensiones (largo, ancho y alto) y humedad.

Posteriormente estas piezas fueron ensayadas para determinar su módulo de elasticidad dinámico a través de dos métodos de vibración acústica “Fakopp y MTG”. Estos consisten en provocar una pequeña excitación en un extremo de la pieza y, por medio de la determinación de la velocidad de la onda y densidad del material, se determina el módulo de elasticidad dinámico (valor entregado de forma directa por ambos equipos).

Finalizados los ensayos dinámicos, a cada probeta de madera ensayada se le calculó la razón de área nudosa total y de borde (RANT y RANB respectivamente).

Luego se sometieron las trozas de pino ponderosa a ensayos de flexión tal como lo establece la norma NCh 3028/1 Of. 2006, con el fin de hallar dos parámetros: el módulo de elasticidad estático y el módulo de elasticidad de rotura.

Finalmente se realizó un análisis estadístico para correlacionar los módulos de elasticidad dinámicos con los módulos de elasticidad estáticos y de rotura. Finalmente se hizo una comparación entre los dos métodos de vibración para determinar sus rangos de confiabilidad.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

La madera es un material noble, fabricado por la naturaleza con un elevado grado de especialización, debiendo sus atributos a la complejidad de su estructura. De aquí la importancia de sus propiedades físicas y mecánicas.

2.1.PROPIEDADES FISICAS DE LA MADERA

Las propiedades físicas de la madera son tres: contenido de humedad, densidad, y contracción.

2.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad (CH) se entiende como la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada como porcentaje de la masa de la pieza anhidra (*Pérez 1983* y *Cuevas 2003*). El peso anhidro es el peso que se obtiene cuando se coloca la madera en una estufa entre 100 y 102°C, hasta que se obtiene un peso constante.

$$CH = \frac{P_i - P_o}{P_o} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Donde

- CH : Contenido de humedad, en porcentaje.
- P_i : Peso inicial, en gramos.
- P_o : Peso anhidro, en gramos.

El contenido de humedad puede variar principalmente debido a la temperatura predominante del lugar donde se utiliza y a la humedad relativa del ambiente que rodean a la madera (*CORMA 2009*).

Al iniciarse la pérdida de humedad, la madera entrega al ambiente el agua libre contenida en sus cavidades hasta alcanzar el “punto de saturación de la fibra” (PSF). Éste

corresponde a un estado en el cual se ha eliminado el agua libre y las paredes celulares permanecen saturadas. Se acepta un PSF de 28 – 30% CH (CORMA 2003).

Según Pérez (1983) y Campos (1190) el contenido de humedad influye en la capacidad mecánica de modo que, a menor contenido de humedad bajo el punto de saturación de la fibra mayor es la capacidad mecánica. Esto conlleva a un incremento de la resistencia de la madera, tanto en flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular. A partir del punto de saturación de la fibra, un aumento en el contenido de humedad no tendrá ninguna incidencia sobre la resistencia de la madera.

La norma chilena NCh 176/1 Of. 2003 “Madera – Parte 1: Determinación de humedad” explica dos métodos (secado en estufa, destilación) utilizados para encontrar el contenido de humedad de la madera. Por su parte, la norma NCh 2827 Of. 2003 especifica el método de xilohigrómetro para el mismo fin.

2.1.2. DENSIDAD

La densidad es una de las propiedades más importantes, ya que de ella depende en gran parte el comportamiento de la madera.

La densidad se define como el cociente entre la masa y el volumen de la madera.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Donde

- ρ : Densidad de la madera, expresada en $\frac{gr}{cm^3}$ ó $\frac{kg}{m^3}$
- m : Masa de la madera, en gramos o kilogramos.
- V : Volumen de la madera, en cm^3 ó m^3 .

La humedad con la densidad son proporcionales, es decir, cuando la humedad aumenta la densidad crece.

La norma NCh 176/2 Of. 1988 “*Madera – Parte 2: Determinación de la densidad*”, hace referencia a distintos tipos de densidades, las cuales son las siguientes.

- **Densidad anhidra:** Relación entre la masa y volumen de una probeta de manera en estado seco (anhidra).
- **Densidad básica:** Relación de la masa de la probeta anhidra y volumen de la madera en estado verde.
- **Densidad nominal:** Relación de la masa de la probeta anhidra y volumen de la madera con un contenido de humedad de 12%.
- **Densidad de referencia:** Relación entre masa y volumen de la probeta de madera, ambos con igual contenido de humedad.
- **Densidad normal:** Relación entre la masa y volumen de la probeta de madera, ambos con un contenido de humedad de 12%.

2.1.3. CONTRACCIÓN

La norma NCh 176/3 Of. 1984 “*Madera – Parte 3: Determinación de la contracción radial y tangencial*” define la contracción como la disminución de dimensiones que sufre la madera al perder humedad bajo el punto de saturación de las fibras, expresada como porcentaje de la dimensión de la madera al estado verde.

Según *Pérez 1983*, la contracción es una de las características más indeseables de la madera y es la responsable en gran medida, de los inconvenientes y dificultades que se encuentran con ella en la construcción. La contracción se define como:

$$C = \frac{D_i - D_f}{D_i} \cdot x 100 \quad (2.3)$$

Donde

- C : Contracción, en porcentaje
- D_i : Dimensión inicial, en mm
- D_f : Dimensión final, en mm

La norma NCh 176/3 además entrega la forma de la curva de contracción, la cual se muestra en la figura 2.1.

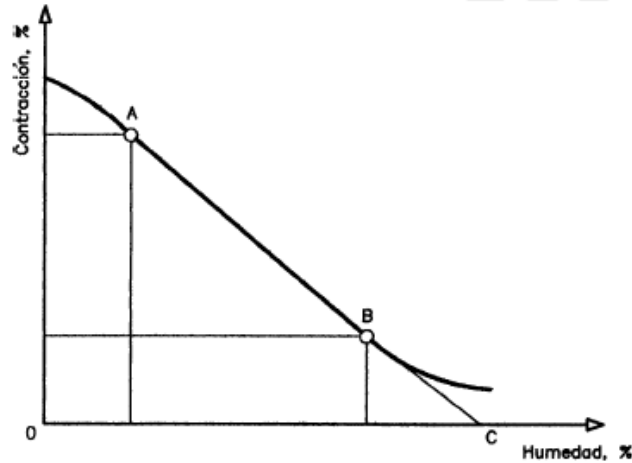


Figura 2.1: Forma de la curva de contracción.

Fuente: NCh 176/3 Of. 1984

2.2. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA

Las propiedades mecánicas son las que determinan la capacidad que tienen los materiales de resistir fuerzas externas, con lo cual se puede controlar las formas más adecuadas (*Pérez 1983*).

2.2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES MECANICAS

La madera presenta variables valores de densidad y resistencia, esto se debe a diferencias genéticas, de ambiente, y/o ambas. La resistencia puede variar aún más cuando sus características no son controladas o controlables. Dentro de las características más importantes se mencionan las siguientes.

- Contenido de humedad: Este parámetro afecta a la flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular, tracción, cizalle, dureza, clivaje.

Según *Díaz-Vaz y Cuevas 1982*, *Pérez 1983* y *Cuevas 2003* sobre el punto de saturación de la fibra la resistencia mecánica se mantiene constante y a medida que

el contenido de humedad disminuye, desde el punto de saturación de la fibra hasta el estado anhidro la resistencia mecánica aumenta, excepto en la propiedad mecánica de tenacidad, la cual disminuye.

- Densidad: Especies madereras con madera densa tienen resistencias altas, mientras que maderas livianas resisten menos. Esto se debe a que la densidad indica la cantidad de sustancia celular presente en una unidad de volumen de madera.
- Ángulo de fibras: Se denomina a este ángulo al formado por la dirección de una carga aplicada y la fibra celular de la madera. Se alcanzan mayores valores de resistencia cuando la sollicitación es paralela a la fibra.
- Nudosidad: Los nudos disminuyen la resistencia de la madera por inducir a una distribución irregular de las tensiones. La presencia de nudos afecta a las propiedades mecánicas debido a la variación de la dirección de las fibras, a las diferencias de densidad entre madera y nudo, y la presencia de grietas cuando la madera se encuentra en estado seco.
- Otras influencias: Los ataques patógenos son capaces de destruir o modificar la pared celular. Existen algunos hongos patógenos, como hongos y mohos cromógenos que no influyen por lo general en las resistencias, a no ser que estén acompañados de degradadores de la madera.

2.2.2. CARGA, ESFUERZO, DEFORMACIÓN

La carga se entiende como toda fuerza externa que es aplicada sobre un miembro o estructura. Toda madera sometida a una fuerza exterior, genera una fuerza interna que se opone a ella, esto es lo que se denomina esfuerzo. Por lo tanto, se entiende por esfuerzo a la fuerza aplicada por unidad de área.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

Donde

- σ : Esfuerzo unitario.
- P : Carga.
- A : Área de la sección.

Existen diferentes tipos de esfuerzos, los que se pueden dar solos o combinados

- Esfuerzo de tensión: Es cuando la fuerza aplicada tiende a estirar el material.
- Esfuerzo de compresión: Ocurre cuando la fuerza aplicada tiende a disminuir la longitud del material.
- Esfuerzo de cizalladura o de corte: Cuando la fuerza aplicada tiende a producir un deslizamiento.

Todo esfuerzo trae consigo una alteración del tamaño o forma de la pieza de madera a la cual se le está ejerciendo una carga, por tanto, a cada esfuerzo se le relaciona un tipo diferente de deformación. *Pérez 1983* define deformación como el desplazamiento de las partículas de un material, como resultado de la aplicación de una carga externa sobre él.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (2.5)$$

Donde

- ε : Deformación
- δ : Deformación total
- l : Largo del cuerpo en la dirección que actúa la fuerza.

La relación que existe entre los incrementos de esfuerzo al que se va sometiendo un cuerpo y sus correspondientes aumentos de deformación se muestra en la figura 2.2.

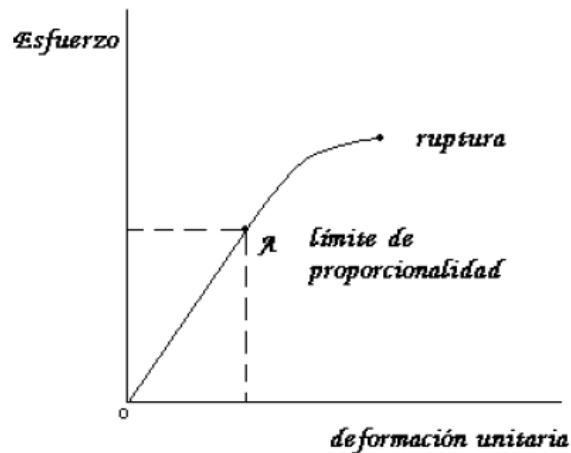


Figura 2.2: Diagrama esfuerzo - deformación

Fuente: Pérez, 1983

La línea resultante está formada por una recta hasta el “límite de proporcionalidad”, este punto indica hasta donde el comportamiento del material es elástico, es decir, al suprimir la carga este puede volver a su estado original. Al seguir aumentando la carga se alcanza el punto de “ruptura”, el cual corresponde a la tensión máxima o de ruptura del material. Pasado el “límite de proporcionalidad” se entra a la zona plástica, en donde cualquier deformación será permanente aunque se suprima la carga aplicada.

2.2.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD, LEY DE HOOKE

La ley de Hooke establece que el esfuerzo es proporcional a la deformación, hasta un determinado valor de carga. Esto se cumple sólo hasta el límite elástico, es decir, hasta el límite de proporcionalidad de la figura 2.2.

A la constante de proporcionalidad se le denomina módulo de elasticidad de un material y esta designado por la letra E.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{constante} \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de un material, entendiéndose por rigidez a la característica de un cuerpo que solicitado a cargas externas mantiene su tamaño y forma natural, es decir, resiste la deformación.

2.3. ENSAYOS PARA DETERMINAR PROPIEDADES MECÁNICAS

El uso que se le dé a la madera depende de su capacidad. Las propiedades mecánicas son aquellas que indican la capacidad de un material para resistir fuerzas externas.

La norma chilena NCh 3028/1 y NCh 3028/2 Of. 2008 establece los métodos para determinar los valores aparentes y admisibles de las siguientes propiedades.

- Resistencia a la flexión
- Resistencia al corte
- Resistencia a la compresión paralela
- Resistencia a la tracción paralela
- Módulo de elasticidad en flexión

La determinación de estos valores hace posible caracterizar las especies madereras.

Debido a que la presente investigación se limita a correlacionar los datos de módulos de elasticidad con módulos de rotura en flexión, se describirá solo lo relacionado con este tema.

2.3.1. FLEXIÓN ESTÁTICA

Los esfuerzos en flexión se producen en cuerpos de gran longitud respecto a las dimensiones de su sección transversal, cuando estos son sometidos a la acción de cargas transversales o normales de su eje longitudinal, la flexión interna tiende a producir arqueadura del elemento.

La flexión es una combinación de tres esfuerzos: tracción, compresión y cizalle. Estas causan la curvatura o deformación del cuerpo, con la parte superior cóncava (en compresión), la inferior convexa (en tracción) y el plano neutro tendiendo a resbalar entre las dos fuerzas

opuestas (en cizalle) (Karsulovic, 1982; Campos, et al, 1990; Cuevas, 2003), lo descrito se aprecia en la figura 2.3.

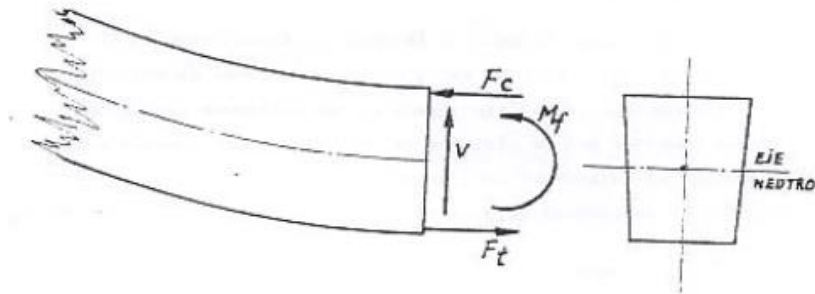


Figura 2.3: Viga en flexión estática.

Fuente: Karsulovic, 1982

En la cara inferior de la viga se aprecia los esfuerzos máximos en tracción y en la cara superior el esfuerzo máximo en compresión. Del ensayo de la prueba en flexión es posible obtener información de su módulo de elasticidad, el cual indica si el material es rígido o flexible. Estas propiedades dependen de la estructura interna que posean los materiales.

El ensayo de flexión estática mide la resistencia que opone una viga a la carga aplicada en los tercios de su luz (figura 2.4), al mismo tiempo mide el desplazamiento del eje neutro de la probeta en el centro de la luz.

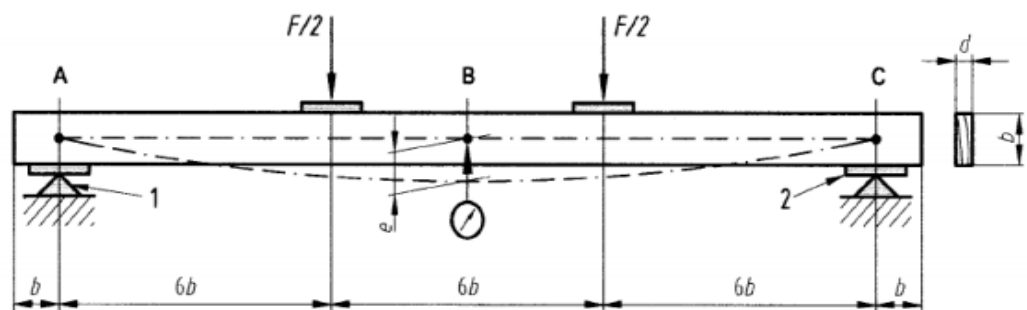


Figura 2.4: Esquema de ensayo de flexión estática

Fuente: NCh 3028/1

Para realizar el ensayo de resistencia y rigidez en flexión (figura 2.5), es importante que se escoja al azar un canto de la probeta como canto flexo-traccionado.

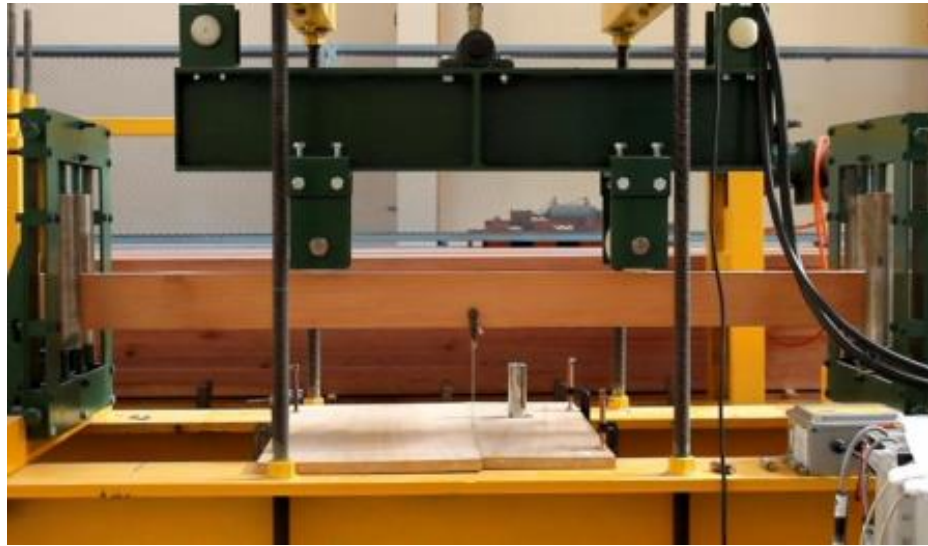


Figura 2.5: Aplicación del ensayo de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/1

Fuente: LME-INFOR

De este ensayo se determina el módulo de elasticidad (E) y la tensión de ruptura en flexión (f_m), los cuales se calculan como sigue:

$$E = \frac{23}{108} \left(\frac{L}{b}\right)^3 \left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right) \frac{1}{d} \quad (2.7)$$

Donde

- E : Módulo de elasticidad en flexión
- L : Luz de la pieza de madera entre apoyos
- d : Espesor de la pieza de madera
- b : Ancho de la pieza de madera
- $\frac{\Delta F}{\Delta e}$: Pendiente de la recta, prolongada del rango elástico de la curva carga-desplazamiento, que se forma de los datos tomados entre el 10% y el 40% de la carga máxima.

$$f_m = \frac{F_{m\acute{a}x}L}{bd^2} \quad (2.8)$$

Donde

- f_m : Resistencia en flexión
- $F_{m\acute{a}x}$: Valor de la carga máxima.

2.4. CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA

Se entiende por clasificación estructural a la técnica mediante la cual las piezas de madera se agrupan según su capacidad para resistir cargas o esfuerzos. Existen tres métodos de clasificación estructural de la madera: clasificación visual, método mecánico y método dinámico. Los dos primeros son los que se encuentran actualmente normalizados en Chile.

2.4.1. CLASIFICACIÓN VISUAL

Es considerado un defecto cualquier irregularidad o imperfección que afecte las propiedades físicas, mecánicas y química de una pieza de madera. Esto reduce el volumen utilizable de madera, su durabilidad, la resistencia y su aspecto, determinando generalmente una limitación en su uso o aplicación.

La norma chilena NCh 1207 Of. 2005 establece las características mínimas que deben cumplir las maderas de pino para su uso en estructuras, mediante una clasificación visual. Este método clasifica las piezas asignándoles un grado estructural, el que depende de la identificación del defecto de mayor incidencia sobre la resistencia de la pieza de madera. Los defectos se clasifican en tres grupos.

- Defectos naturales o de crecimiento (Árbol en pie): Están relacionados por la forma como crece el árbol o por anomalías en el crecimiento, los defectos más comunes son: médula incluida, fibra torcida, nudos, acebolladuras, bolsillos de resina, bolsillos de corteza (figura 2.6).

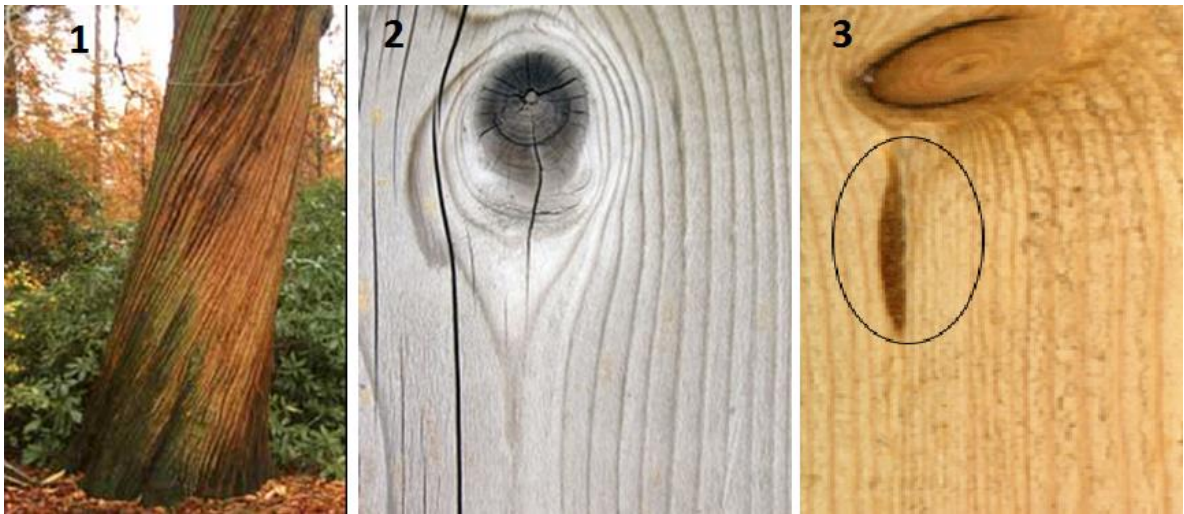


Figura 2.6: Fibra torcida, nudo, y bolsillo de resina (1, 2 y 3 respectivamente)

Fuente: Armstrong, 2000

- Defectos originados por organismos extraños (hongos, insectos).
- Defectos originados por procesos de secado y elaboración.

2.4.2. MÉTODO MECANICO

Este método no destructivo consiste en medir el módulo de elasticidad de las piezas, por medio de métodos mecanizados y automatizados. Son aquellos que se basan en la aplicación de fuerzas y medición de las deformaciones.

Los equipos de clasificación mecánica son alimentados de manera continua, con piezas de madera que son sometidas a flexión, produciendo un momento flector sobre su eje más débil. El procedimiento para esto, puede consistir en aplicar una carga determinada y medir la deflexión provocada, o aplicar una carga hasta conseguir una deflexión predeterminada. A partir de estas medidas se deduce el módulo de elasticidad en flexión a lo largo de varias secciones de la pieza (Iñiguez, G., 2007).

La versión más sencilla del equipo anterior es la denominada máquina de ensayos universal (Figura 2.7). El procedimiento consiste en un ensayo a flexión bi-apoyado sometiendo la pieza a carga durante el tramo de comportamiento elástico del material. A

partir del diagrama fuerza-deformación se calcula, por las fórmulas clásicas de la mecánica, el módulo de elasticidad.



Figura 2.7: Maquina universal de ensayos

Fuente: Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 6 (17), 2009

2.4.3. MÉTODOS DINAMICOS

Estos métodos no destructivos están basados en la determinación de la velocidad de transmisión del sonido en el material (figura 2.8). La velocidad de transmisión de un impulso generado por un impacto puede determinarse a partir de la medición del tiempo de propagación y la medición del largo de la pieza. Una importante propiedad dinámica de todo sistema elástico es la frecuencia natural de vibración. Para una pieza de determinadas dimensiones que se encuentra vibrando, la frecuencia natural asociada a su vibración está principalmente relacionada con sus propiedades físicas (densidad) y mecánicas (módulo de elasticidad). Por tanto, el módulo de elasticidad dinámico de un material puede ser determinado mediante la medición de la frecuencia natural de vibración de una pieza de dimensiones conocidas y de su densidad (*Pilichi, O., 2009*).



Figura 2.8: Análisis de vibración longitudinal

Fuente: <http://eligemadera.blogspot.cl/2014/11/certificacion-de-la-madera-para-uso.html>

La ecuación que describe el módulo de elasticidad dinámico es la siguiente

$$E_d = (2 \cdot L \cdot f)^2 \cdot \rho \quad (2.9)$$

Donde

- E_d : Módulo de elasticidad dinámico
- L : Longitud de la probeta
- f : Frecuencia natural de vibración longitudinal
- ρ : Densidad del material

Íñiguez, G., 2007 dice que la velocidad de propagación está dada por

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \rightarrow E_d = v_p^2 \rho \quad (2.10)$$

Donde

- v_p : Velocidad de propagación, en m/s

De las dos ecuaciones presentadas anteriormente se puede determinar la frecuencia de la siguiente manera.

$$f = \frac{v_p}{2L} \quad (2.11)$$

2.5. ANTECEDENTES DEL PINO PONDEROSA

2.5.1. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

La madera de pino ponderosa varía ampliamente en apariencia y en propiedades generales. Los árboles maduros tienen una albura (últimos anillos de crecimientos del árbol) muy delgada, de color amarillento pálido, blanda, no resinosa y uniforme en textura. El duramen (parte del tronco que forma parte del xilema) es de un color rosado profundo a café rojizo claro y es considerablemente más pesado que la albura, es de lenta formación, llegando a formar un 5% del volumen total a edades de 45 años (*INFOR, Valdivia, 2003*).

Los canales resiníferos son bastante más prominentes en la superficie longitudinal, especialmente en el duramen, con líneas café oscuras. Esta especie en ocasiones presenta una apariencia porosa sobre su superficie tangencial. Como referencia en la figura 2.9 se indican las partes del tronco de un árbol.

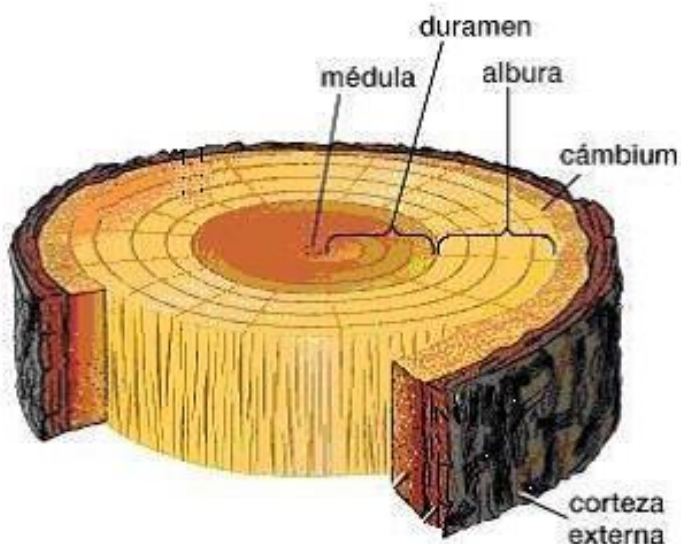


Figura 2.9: Partes del tronco de un árbol

Fuente: Icarito: El esqueleto de un árbol, 2009

2.5.2. USOS

El pino ponderosa a nivel internacional es usado principalmente para madera de construcción y en menor grado en estacas, postes, maderas para minas, chapas y durmientes. La madera de color clara es usada para marcos de ventanas, puertas, celosías, molduras, paneles, madera de recubrimiento interior. Dentro de sus usos industriales se incluyen pallets, cajas de embalaje y madera de estiba. En Nueva Zelanda la especie ha sido usada para kraft y pulpa termomecánica, sin grandes problemas

Según *AIFP, 2002* la madera de esta especie es elegida cuando es la apariencia, y no la resistencia o dureza, la característica de mayor importancia en el uso.

Actualmente en Chile, el pino ponderosa se trabaja con plan de manejo en la Reserva Nacional Coyhaique, en dicho lugar la especie es trabajada para ser combustible (leña) que es entregado a las familias más vulnerables, además la madera es utilizada para crear barandas, mesas y otros artefactos que sean utilizados dentro de la ASP (áreas silvestres protegidas).

CAPITULO 3

METODOLOGIA

Tanto la clasificación, identificación y registro de propiedades de cada probeta estudiada fueron realizadas de forma previa a la realización de las mediciones del módulo de elasticidad dinámico. De igual forma a continuación se explica brevemente en que consistió cada una de estas etapas.

3.1. CLASIFICACIÓN VISUAL

La clasificación visual se hizo para determinar el grado estructural de las probetas a ensayar. La norma que rige esta clasificación fue la NCh1207 Of.2005. Esta norma establece los requisitos que debe cumplir la madera aserrada o cepillada seca ($H \leq 19\%$) provenientes de especies coníferas, destinada a un uso estructural y que se clasifica con un procedimiento visual. Es importante señalar que dentro de las especies coníferas a las cuales se aplica esta norma no está considerado el pino ponderosa. Sin embargo, se acepta el uso de la norma nombrada con anterioridad, siempre que se tenga el debido conocimiento del grupo estructural, en estado seco, al cual pertenezcan.

El método de clasificación consiste en una inspección visual de los defectos que cada pieza presenta en todas sus superficies (caras, cantos y cabezas) en el momento de la clasificación, considerando solo aquellos defectos que inciden sobre su resistencia y que se indican en la tabla 3.1.

La clasificación visual fue realizada por un especialista del Instituto Forestal (INFOR), el cual agrupo 70 probetas de grado estructural G1 y 70 probetas de grado estructural G2, las cuales fueron marcadas en las cabezas para distinguirlas (rojo y verde para G1, sin color para G2), se puede apreciar en la figura 3.1.



Figura 3.1: Trozas de madera Pinus Ponderosa Dougl.Ex Law ensayados.

Fuente: Archivo propio

Tabla 3.1: Exigencias para los grados estructurales visuales de Pino radiata.

Fuente: NCh 1207 Of.2005.

Defectos	Grados estructurales Visuales					
	GS		G1		G2	
Nudos	Sin CB	Con CB	Sin CB	Con CB	h ≤ 150mm	h > 150 mm
RANB	≤ 50%	> 50%	≤ 50%	> 50%	Sin Restricción	Sin Restricción
RANT	≤ 33%	≤ 20%	≤ 50%	≤ 33%	≤ 66%	≤ 50%
RANI					≤ 50%	≤ 33%
RANNA	No se Acepta	No se Acepta	≤ 25%	≤ 25%	≤ 33%	≤ 33%
Inclinación de fibra	1:8		1:6		1:6	
Médula	No se Acepta		Se acepta sólo en la mitad central del ancho + Ancho de médula de hasta 12 mm en cualquier largo; o ancho de médula de hasta 18 mm en largo no superior a 100 mm		Se acepta sin restricción	
Arista faltante En todo el largo	El canto muerto no puede ser mayor a un cuarto del ancho y a un cuarto del espesor de la pieza					
Bolsillos de resina y corteza	Acepta bolsillos de hasta 20 mm de ancho y 200 mm de largo, o superficie equivalente					
Fisuras	Grietas	Se ignoran si su profundidad es menor a 10 mm				
		Acepta largos de hasta ¼ del largo de la pieza, con un tope de 600 mm	Acepta largos de hasta ¼ del largo de la pieza, con un tope de 900 mm			
	Rajaduras	Se acepta no más de una rajadura				
		Se acepta en extremos y de largo menor o igual al espesor de la pieza	Se acepta de largo menor o igual a 600 mm; o en los extremos y de largo menor o igual a 1,5 veces el espesor de la pieza			
CB: Condición de borde; h: ancho de la pieza						

3.2.IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS

Luego de ser clasificadas las probetas debieron enumerarse como lo muestra la figura 3.2. La enumeración se realizó por medio de un código interno el cual detalla el cliente, grado estructural y número de probeta.

La sigla “S XXX” indica cliente el cual siempre fue el mismo por lo que quedo expresado como S020. La sigla “FE XX” es el grado estructural, teniendo solo dos posibilidades 01 (grado estructural G1) ó 02 (grado estructural G2). Finalmente la sigla “P XXX” indica el número de probeta, en este caso varía de 001 a 070. Por lo tanto, los dos grupos a estudiar fueron:

- S020-FE01-PXXX, donde XXX varía de 001 a 070.
- S020-FE02-PXXX, donde XXX varía de 001 a 070.



Figura 3.2: Enumeración trozas madera (Cliente-Grado estructural-N° probeta)

Fuente: Archivo propio

3.3.PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE MADERA

Se determinaron las propiedades geométricas de la madera por medio de un pie de metro (mejor precisión) y una huincha de medir. En el caso del largo se midió con la huincha de medir registrando su valor para cada una de las probetas a ensayar. Para el ancho y espesor

se tomó la medida por medio de un pie de metro en tres zonas, las cuales fueron en la parte media de cada tercio de la probeta (figura 3.3), para luego obtener el promedio.

La humedad también fue tomada en tres partes (centro de cada tercio) por medio de un xilohigrometro portátil.

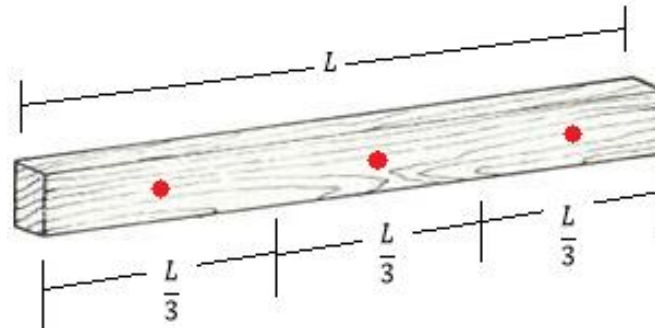


Figura 3.3: Lugar de medición de las propiedades (en rojo)

Fuente: Elaboración propia.

3.4.MEDICIÓN MÓDULO DE ELASTICIDAD DINAMICO

3.4.1. TIMBER GRADER MTG – BROOKHUIS

Este instrumento consta de dos partes principales, la primera de ellas es el instrumento que genera la excitación en la probeta (figura 3.4). La segunda es la serie de artefactos que al estar conectados entre sí y con previa instalación del software mostrará el resultado del análisis en pantalla del ordenador (Figura 3.5).



Figura 3.4: Medidor Timber Grader MTG.

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.

El medidor tiene incorporado un percutor interno y un sensor que capta cuánto tarda la onda del sonido en ir y volver al punto de origen. Para accionar el percutor se debe presionar el botón amarillo (figura 3.4) y casi de forma instantánea en la pantalla del medidor aparecerá el resultado de la medición.



Figura 3.5: Accesorios para instalación de software MTG

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.

Como se mencionó anteriormente antes de obtener los datos se requiere tener instalado el software en un ordenador, a su vez este ordenador debe conectarse a una balanza la que va unida a dos apoyos, como se muestra en figura 3.6.



Figura 3.6: Montaje equipo MTG

Fuente: Archivo propio.

Una vez que todo esté montado (figura 3.6) se abre el software previamente instalado en el ordenador, en él se presiona “comenzar” y se abrirán las siguientes ventanas.

Batch	
Batch No:	MTG0116000010
Customer:	HSA, Estacion
Supplier:	Brookland
User:	Brook
Setting:	CE1602
Customer ref.:	24 november 2009
Supplier ref.:	
Mfr.:	BVE

Figura 3.7: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 1 de 3).

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.



Figura 3.8: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 2 de 3)

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.

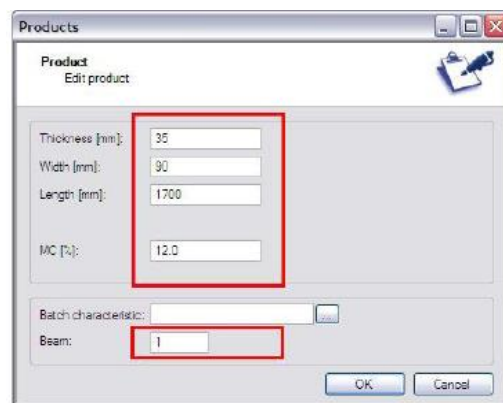


Figura 3.9: Ingreso de datos a Brookius, MTG (Parte 3 de 3)

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.

En la primera de las imágenes se debe introducir la identificación de la probeta, cliente, nombre de la especie a analizar y nombre del analizador. Luego se define tipo de especie, y finalmente se ingresan las propiedades de la probeta en estudio (largo, ancho, espesor y porcentaje de humedad) siendo estos últimos diferentes para las 140 probetas de pino ponderosa. Una vez ingresado todos los datos se procede a presionar “OK” y Timber Grader MTG estará listo para medir.

El medidor debe acercarse a un extremo de la probeta y ejercer una leve presión sobre ella, luego se pulsa el accionador (botón amarillo) y la medición ya estará realizada. Se debe verificar que el medidor este perpendicular a la probeta a medir, cuidando no tener inclinación.

La utilización de este instrumento siempre conlleva a errores, mayoritariamente de factor humano. Esto se debe a que es difícil asegurar que para cada medición se genera la misma presión “instrumento–probeta”, así como también la ubicación del equipo, procurando siempre que no exista inclinación alguna (Figura 3.10).



Figura 3.10: Errores en medición con Timber Grader MTG.

Fuente: Operating instructions, Timber Grader MTG.

Debido a esto se buscó el error asociado a la persona que realizó la totalidad de las pruebas, mediante un ensayo de repetición. Se seleccionó una probeta aleatoria (S020-FE01-P002), se registraron sus dimensiones y propiedades (grosor, ancho, largo y humedad). Se procedió a comenzar las mediciones, procurando realizar el mismo procedimiento en cada una de ellas, para luego repetirlo en las 139 probetas restantes.

Además de realizar el experimento para obtener el error asociado por falla humana, se realizó uno para ver cómo afecta el ruido ambiental a la medición. Esto se hizo midiendo el módulo de elasticidad dinámico a una probeta de madera en condiciones normales, luego se procedió a realizar lo mismo generando un ruido constante al momento de medición (Figura 3.11). Así se obtuvo el mismo resultado que en condición normal, se repitió varias veces sin registrarse variaciones significativas, por lo que se considera que el ruido ambiental no afecta considerablemente el resultado para el equipo Timber Grader MTG – Brookhuis.



Figura 3.11: Generación ruido, imagen referencial.

Fuente: Manuela Brookhuis.

Una vez obtenido el error asociado a la medición y demás pruebas con el equipo Timber Grader MTG se comienza a ensayar la totalidad de las probetas de *Pinus ponderosa Dougl. Ex Laws.*, teniendo especial cuidado que para cada medición se ingrese las propiedades correspondientes a cada probeta.

3.4.2. PORTABLE LUMBER GRADER DE FAKOPP ENTERPRISE

Este equipo es similar al anterior, posee un sistema de apoyo, un micrófono, balanza, y martillo. Para comenzar a implementar este instrumento se debe tener instalado previamente el software en un ordenador.

Lo primero que se debe verificar antes de comenzar cada ensayo es que la balanza este en cero. En caso de que no marque cero, se debe presionar el botón “Tare”.

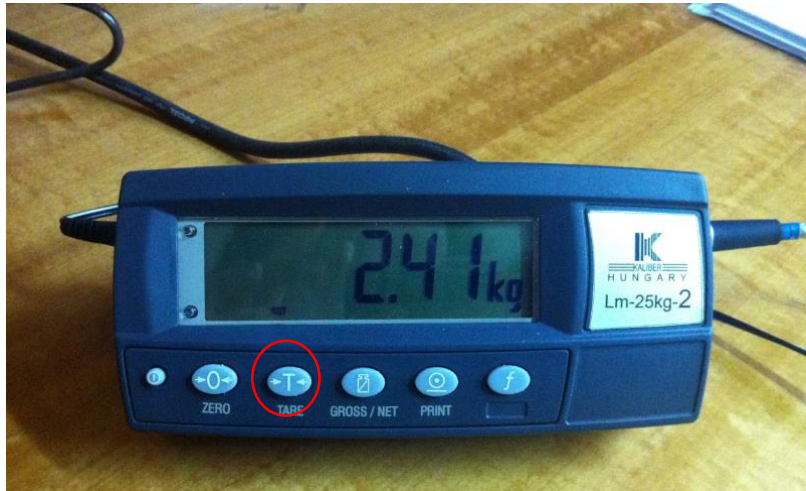


Figura 3.12: Monitor de balanza de equipo Fakopp.

Fuente: Archivo propio

Luego se procede a instalar la probeta sobre el equipo de medición. Como la totalidad de las probetas tienen un largo promedio de 3.2 m se deben montar sobre dos apoyos, posicionados en los extremos de la probeta, uno de los apoyos es la balanza, mientras que el otro un apoyo que viene con la instrumentación (Figura 3.13).



Figura 3.13: Montaje de la probeta en equipo Fakopp.

Fuente: Archivo propio

Una vez posicionada la probeta sobre los apoyos se debe ubicar el micrófono, como muestra la figura 3.14. Este debe estar ubicado exactamente en el centro de la cara exterior y a 2.5 cm del extremo de la probeta a ensayar (Padilla, J., 2014).



Figura 3.14: Posicionamiento de micrófono.

Fuente: Archivo propio

Luego se deben ingresar los datos al software instalado previamente en el ordenador a utilizar (Figura 3.15). Los primeros tres datos que se ingresan son datos de entrada, el largo, ancho, y espesor de la pieza. Es importante recalcar que estos tres primeros datos cambian para cada probeta, al igual que la humedad (moisture difference).

Después se debe identificar el tipo de especie maderera a ensayar, para este estudio se ocupó una especie conífera, por lo que se debe seleccionar la opción de “Coniferous”.

El software establece un nivel de sonido (“Tigger level”) para la activación de la medición, cuando el ruido ambiental es alto se debe ingresar 80%, es decir, se filtran todas aquellas señales menores al 80% de la amplitud máxima que puede registrar el instrumento. Cuando el ruido ambiental es indistinguible se ingresa 0%, cuando se ingresa la opción de 100% la función de activación de la medición se bloquea. El valor que pre-establece el fabricante es de un 50%, es decir, se está filtrando todas aquellas señales menores al 50% de la amplitud máxima que puede registrar el instrumento.

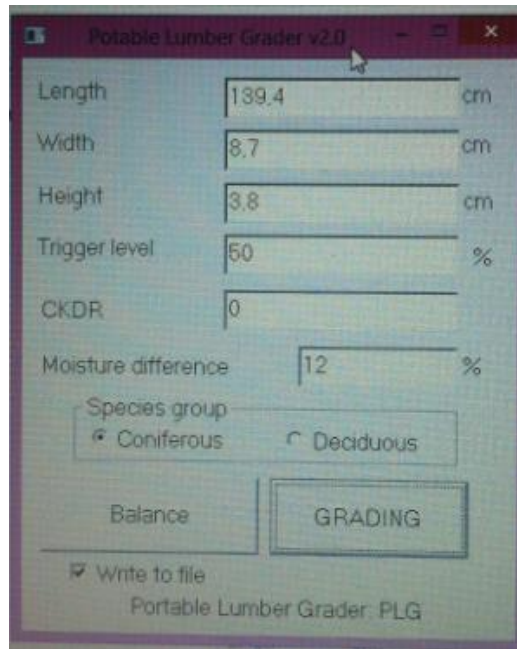


Figura 3.15: Ingreso de datos en software.

Fuente: Archivo propio, imagen referencial.

Para finalizar la configuración del software se debe seleccionar la opción “Balance”, en donde dependiendo de la ubicación de la balanza se debe escoger “FULL” cuando la balanza está ubicada en el centro de la probeta a ensayar, es decir, está sosteniendo toda la masa de la pieza. En caso contrario se debe escoger “HALF” cuando la balanza está ubicada en un extremo de la probeta a ensayar, es decir, está sosteniendo la mitad de la masa de la pieza.

Luego se selecciona “write to file” (sirve para guardar en archivo *.txt), posterior “GRADING” y se procede a golpear la probeta.

Al igual que para el equipo descrito en el ítem 3.4.1 se busca el error asociado a la medición, debido a que la manipulación de las piezas se hace por completo por el capital humano. En este caso se procede de igual forma que la antes descrita, con la diferencia que primero se busca el error en una pieza de dimensiones menores a la comercial existente en el país y posteriormente en una probeta aleatoria de entre las evaluadas (S020-FE02-P004).

Un factor importantes es la intensidad del golpe generado por el martillo contra la probeta de madera que se busca analizar, se procede a realizar varios ensayos a una misma

probeta de madera cambiando la intensidad del golpe, en donde se comprueba que la intensidad no interfiere en el valor de módulo de elasticidad buscado.

3.5.DETERMINACIÓN DE RANT Y RANB

Se obtuvo la razón de área nudosa total (RANT) y si existe o no razón de área nudosa en la zona de borde (RANB) de la totalidad de las probetas de pino ponderosa (Anexo 1). Se utilizó la norma NCh 1207 Of. 2005 “Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad” para llevar a cabo este procedimiento, teniendo como guía la tabla 3.2

Tabla 3.2: Límites admisibles para los grados estructurales visuales. Fuente: NCh 1207 Of. 2005

Defectos	Grados					
	GS		G1		G2	
Nudos	Sin Cb	Con Cb	Sin Cb	Con Cb	h ≤ 15 cm	h > 15 cm
- RANT	≤ 0,33	≤ 0,20	≤ 0,50	≤ 0,33	≤ 0,66	≤ 0,50
- RANB	≤ 0,50	≥ 0,50	≤ 0,50	≥ 0,50	SR	SR
- RANI	SR	SR	SR	SR	≤ 0,50	≤ 0,33

La razón de área nudosa total y razón de área nudosa en la zona de borde miden en que porcentaje afectan los defectos a las piezas de madera. La figura 3.16 muestra la manera de medir algunos defectos.

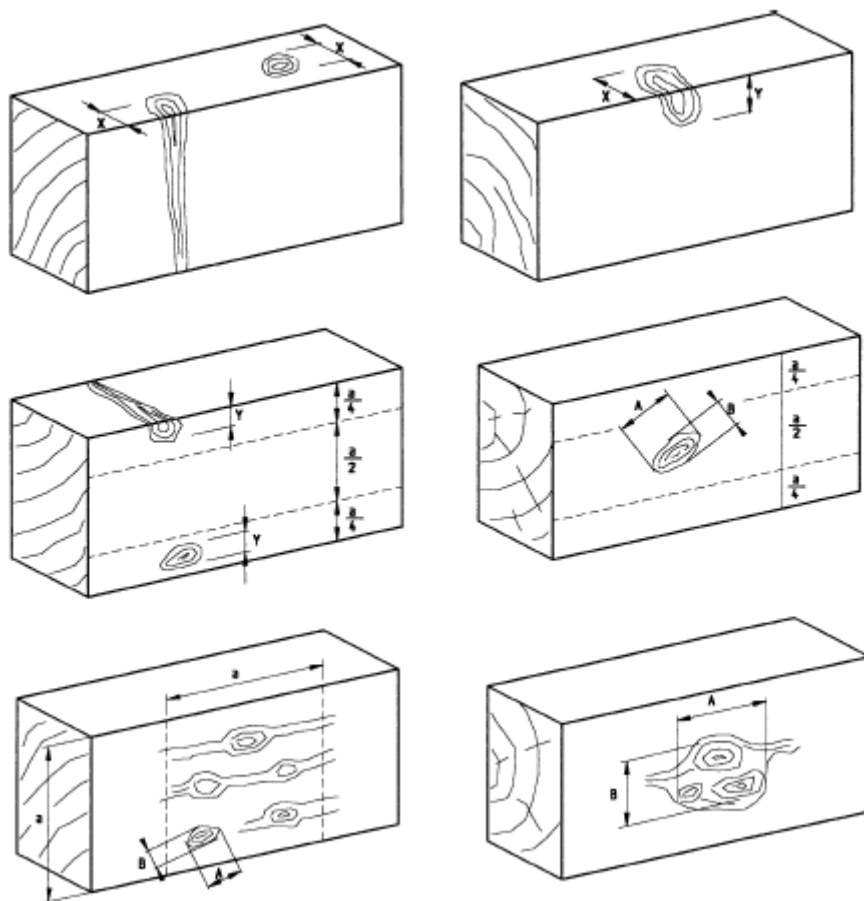
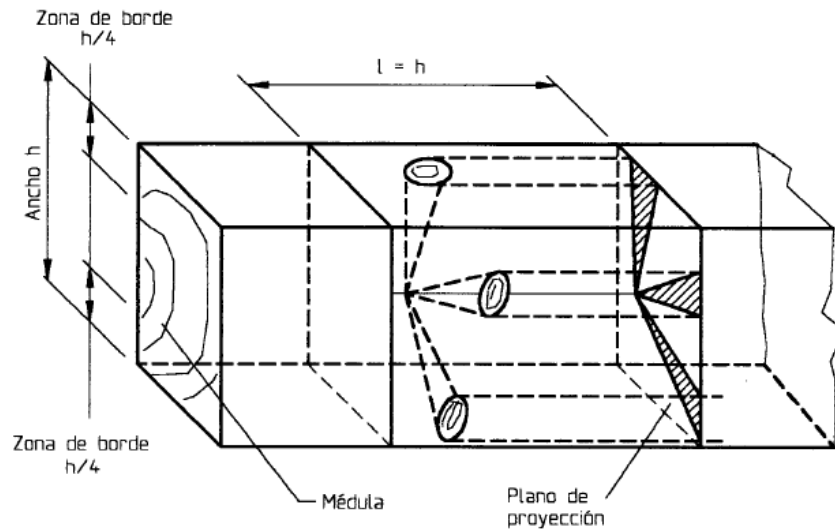


Figura 3.16: Manera de medición de defectos en piezas de madera.

Fuente: NCh 992 Of. 72

Es importante definir dos conceptos claves para llevar a cabo este procedimiento.

- **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 comprendidos en una longitud igual al ancho de la pieza y el área de su sección transversal (NCh 1207 Of. 2005). En la figura 3.17 se ejemplifica lo descrito



b) Vista isométrica de un grupo de nudos en una pieza y su proyección sobre un plano transversal

Figura 3.17: Proyección de nudos sobre un plano transversal

Fuente: NCh 1207 Of. 2005

- **Razón de área nudosa en la zona de borde (RANB):** razón entre la suma de las áreas proyectadas sobre la sección transversal de todos los nudos o piezas de nudos, en una zona de borde, comprendidos en una longitud de pieza igual al ancho de la misma y el área de la sección transversal de la zona de borde (NCh 1207 Of. 2005).

Se entiende como zona de borde a la superficie de la sección transversal adyacentes a los cantos, correspondientes cada una a la cuarta parte del área de la sección transversal de la pieza (NCh 1207 Of. 2005).

3.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD A FLEXIÓN ESTÁTICA Y TENSIÓN DE ROTURA A FLEXIÓN

Para la medición del módulo de elasticidad estático y tensión de rotura a flexión se utilizó el marco de reacción descrito en el punto 2.3.1. Todas las probetas varían unas con otra en las dimensiones de sus medidas, por lo que aproximadamente se puede decir que son de escuadría 41x90 cm y una longitud de 3.20 m.

El LME-INFOR cuenta con un sistema computacional que registra de forma digital los datos de carga aplicada y deflexión asociada a cada probeta ensayada. La figura 3.18 muestra el esquema del ensayo a flexión.

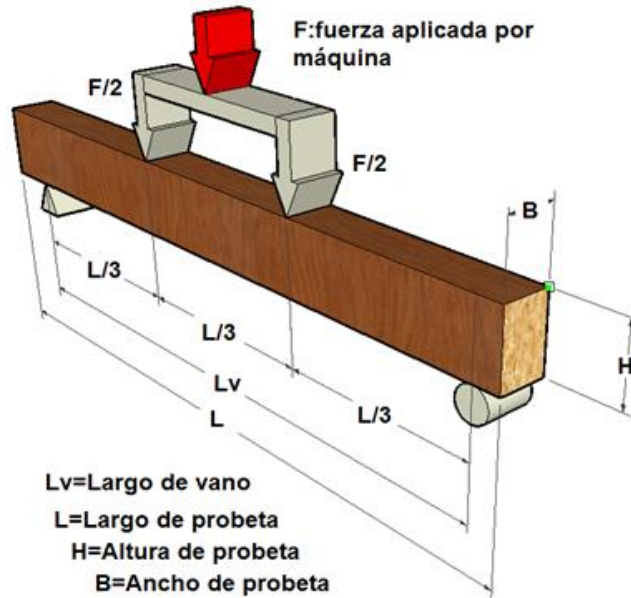


Figura 3.18: Esquema del ensayo a flexión

Fuente: Informe ensayo mecánico: LME-INFOR

Se debe montar la probeta en el marco de reacción, procurando que haber escogido al azar un canto de la viga como canto de tracción. Luego se comienza a aplicar la carga F hasta alcanzar la ruptura de la probeta. Se debe generar una velocidad de ensayo tal que la falla se produzca cerca de los 60 segundos de iniciado el ensayo mecánico.

Los resultados de este ensayo (módulo de elasticidad a flexión estática y tensión de rotura en flexión) son entregados por el sistema que posee el laboratorio de estructuras de madera, INFOR Bio Bio.

3.7.AJUSTE PARA VALORES DE ENSAYO DE FLEXIÓN ESTÁTICA

Debido a que no toda la madera se encuentra con el mismo valor de humedad, los valores entregados por el ensayo de flexión estática deben ser ajustados a una humedad única del 12%. Esto es posible gracias a la norma chilena NCh 3028/2 Of.2008 “Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su

resistencia – Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas de tamaño estructural”.

El módulo de elasticidad estático en flexión se ajusta con la siguiente ecuación:

$$E_{f,12\%} = E_f \left\{ \frac{(B_1 - (B_2 H_2))}{(B_1 - (B_2 H_1))} \right\} \quad (3.1)$$

Donde

- $E_{f,12\%}$: Módulo de elasticidad estático en flexión al 12% de C.H.
- E_f : Módulo de elasticidad estático en flexión determinado experimentalmente.
- H_1 : Contenido de humedad de la probeta, en %.
- H_2 : 12% de C.H.
- B_1, B_2 : Constantes entregadas en tabla 3.3

Tabla 3.3: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para módulo de elasticidad estático en flexión. Fuente: NCh 3028 Of. 2008

Coefficientes	Valores
B_1	1,857
B_2	0,0237

Cuando la tensión de rotura en flexión (f_m) es ≤ 16.6 MPa, no requiere ajuste, es decir, $f_{m,12\%} = f_m$

En caso de ser > 16.6 MPa, se debe realizar un ajuste con la ecuación siguiente.

$$f_{m,12\%} = f_m + \left\{ \frac{(f_m - B_1)}{(B_2 - H_1)} \right\} (H_1 - H_2) \quad (3.2)$$

Donde

- $f_{m,12\%}$: Tensión de rotura en flexión al 12% de C.H.
- f_m : Tensión de rotura en flexión determinado experimentalmente
- B_1, B_2 : Constantes entregadas en tabla 3.4

Tabla 3.4: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para tensión de rotura en flexión

Fuente: NCh 3028 Of. 2008

Coefficientes	Valores
B_1	16,65
B_2	40

También es necesario realizar un ajuste al módulo de elasticidad al 12% del contenido de humedad a valores aparentes. Según lo especificado en la norma NCh 3028/2 Of. 2008 los módulos aparentes se pueden estandarizar con respecto a una relación luz/profundidad y una configuración de cargas específicas (tabla 3.5).

Tabla 3.5: Factores K para ajustar el módulo de elasticidad aparente a las vigas simplemente apoyadas. Fuente: NCh 3028 Of. 2008

Carga	Deflexión medida en:	Ki
Concentrada en la mitad del tramo	Mitad del tramo	1,200
Concentrada en los puntos tercios	Mitad del tramo	0,939
Concentrada en los puntos tercios	Puntos de carga	1,080
Concentrada en los puntos cuartos extremos	Mitad del tramo	0,873
Concentrada en los puntos cuartos extremos	Puntos de carga	1,200
Uniformemente distribuida	Mitad del tramo	0,960

La ecuación para ajustar el módulo de elasticidad al 12% de contenido de humedad a su correspondiente módulo de elasticidad aparente, se obtiene de la siguiente forma.

$$E_{f,a} = \frac{1 + K_1 \left(\frac{h_1}{L_1}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right)}{1 + K_2 \left(\frac{h_2}{L_2}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right)} E_{f,12\%} \quad (3.3)$$

Donde

- $E_{f,a}$: Módulo de elasticidad en flexión aparente al 12% de contenido de humedad.
- L_1, L_2 : Distancia total entre los apoyos de la viga (luz).
- h_1, h_2 : Altura nominal de la sección transversal de la viga.
- E : Módulo de elasticidad libre del efecto del esfuerzo de corte.
- G : Módulo de corte.
- K_1 : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de carga que se desea atribuir su uso (tabla 3.5).
- K_2 : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de ensayo que fue medido (tabla 3.5).

Con respecto a la condición del ensayo y con base en la tabla 3.5, se obtiene que el valor utilizado de K_1 fue de 0.960, mientras que el valor utilizado de K_2 fue de 0.939.

Para poder realizar las estadísticas experimentales con las propiedades admisibles es necesario realizar un ajuste a los valores obtenidos del módulo de elasticidad aparente y de la tensión de rotura al 12% de humedad. Este ajuste fue posible realizarlo con los factores mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Factores de reducción para obtener valores admisibles.

Fuente: NCh 3028 Of. 2008

Propiedad	Factor
Módulo de elasticidad	1
Tensión de rotura en flexión	1/2,1
Resistencia de tracción	1/2,1
Resistencia de compresión paralela a la fibra	1/1,9
Resistencia de cizalle	1/4,1
Resistencia de compresión normal a la fibra	1/1,67

Para determinar los valores admisibles se utilizó un enfoque paramétrico debido a que su utilización es más rápida y clara. El método consta en realizar un histograma de frecuencia, al cual se le ajusta una curva de distribución de probabilidad normal, mediante la cual se estima el percentil 5.

Para el caso del módulo de elasticidad, el valor admisible que se le asocia es el valor promedio aritmético de la muestra.

3.8.PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

3.8.1. ANALISIS DE REGRESIÓN

Un análisis de regresión genera una ecuación para describir la relación estadística entre uno o más predictores y la variable de respuesta y para predecir nuevas observaciones.

Mediante el uso de herramientas estadísticas se busca un modelo explicativo que relacione el módulo de elasticidad a flexión estática con el 12% de C.H. y el módulo de elasticidad dinámico.

Los datos que se analizaron se representan a través de un diagrama de dispersión, a los cuales para este estudio se realizaron ajustes lineales para luego hacer una comparación. La regresión lineal se hizo mediante el software Microsoft Excel 2010, obteniéndose inmediatamente la ecuación de la recta ajustada, la cual tiene como forma general la siguiente:

$$y = a + bx \tag{3.4}$$

Donde

- y : Variable dependiente.
- a : Intersección.
- b : Parámetro que mide la influencia que tiene la variable explicativa sobre la variable respuesta.
- x : Variable independiente.

Para verificar el nivel de ajuste que se ha conseguido con el modelo se obtuvo el coeficiente de determinación R^2 , el cual explica el porcentaje de la variación de la variable dependiente a través del comportamiento de la variable independiente.

El coeficiente de determinación está dado por:

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (3.5)$$

Donde

- σ_{XY} : Covarianza de (X,Y)
- σ_X : Desviación típica de la variable X.
- σ_Y : Desviación típica de la variable Y.

El valor de la covarianza siempre se encuentra entre 0 y 1, mientras más cercano esté el valor a 1, mejor será el modelo para predecir el comportamiento de la variable dependiente.

Existe también el caso cuando se quiere hallar una variable considerando más de un dato de entrada, en estos casos se utiliza la regresión lineal múltiple. El procedimiento usual para ajustar un modelo de regresión lineal múltiple es por mínimos cuadrados, lo que conduce a la solución de un sistema de ecuaciones lineales.

Este procedimiento utiliza como hipótesis nula que los coeficientes de regresión parcial son estadísticamente distintos de cero, esto implica que al ocurrir un cambio en las variables regresoras (independientes), estos cambios se traducen en modificaciones en la variable dependiente.

3.8.2. GRADOS ESTRUCTURALES A PARTIR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

La madera estructural que se clasifica mediante una relación lineal entre los parámetros de módulo de elasticidad dinámico y tensión de rotura cae en una de las cuatro categorías presentadas en la figura 3.19.

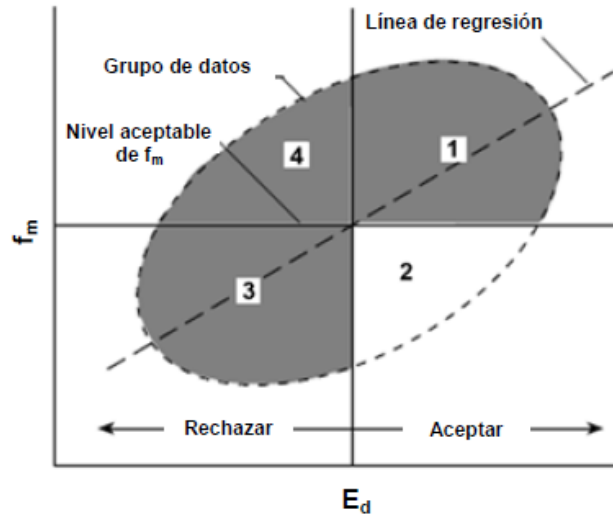


Figura 3.19: Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de regresión como predictor. Fuente: Modificado de Green, D., 1999

- Categoría 1: El material se acepta correctamente dentro de un grado, es decir, el material resiste una tensión suficiente como la especificada para el grado y tiene un módulo de elasticidad acorde a su calidad estructural.
- Categoría 2: El material se acepta dentro de un grado de manera incorrecta, es decir, no cumple con la tensión de rotura especificada para el grado pero si cumple con el módulo de elasticidad.
- Categoría 3: El material se rechaza correctamente, ya que no cumple con la tensión de rotura y tampoco con el módulo de elasticidad esperado para el grado.
- Categoría 4: El material se rechaza correctamente, debido a que no cumple con el módulo de elasticidad requerido para el grado estructural, aunque sí lo haga para la tensión de rotura.

Según definición de cada categoría se espera que piezas de madera catalogadas como dos presenten algún tipo de problema (se acepta de manera incorrecta), producto de esto se buscó minimizar la asignación a la categoría 2.

La figura 3.20 muestra el nuevo modelo de predicción el que incorpora una línea de confianza inferior, la cual corresponde a la misma línea de regresión desplazada hasta el punto donde se establece la tensión de rotura admisible del grado.

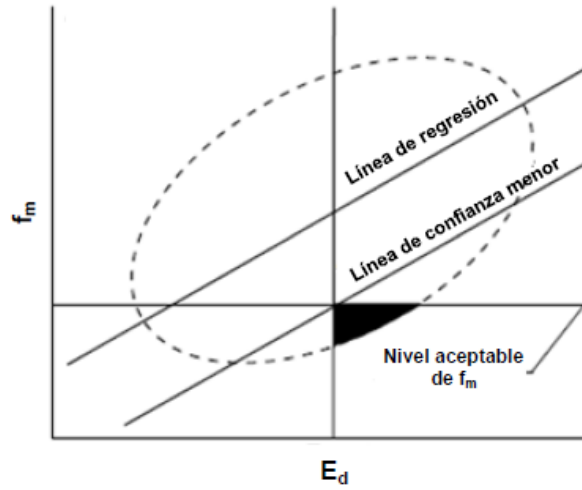


Figura 3.20: Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de confianza menor como predictor. Fuente: Modificado de Green, D., 1999

CAPITULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.ERRORES ASOCIADOS

Antes de dar a conocer los resultados de las propiedades de las probetas, su densidad, módulos de elasticidad, tensión de ruptura, es importante mencionar que existieron cuatro probetas conflictivas.

Las tres primeras probetas que se mencionan a continuación presentan un error al utilizar el equipo Portable Lumber Grader (PLG) de Fakopp. Dos de estas probetas registran valores diferentes del módulo de elasticidad dinámico dependiendo de qué extremo de la pieza se golpee, mientras que una de ellas registra siempre valores muy elevados en comparación con las 69 piezas restantes. Las probetas y los valores del módulo de elasticidad dinámico (E_d) son los siguientes:

- **S020 – FE02 – P039:** Por un extremo registra E_d 12,3 GPa, mientras que por el extremo contrario E_d 3,3 GPa.
- **S020 – FE02 – P051:** Siempre registra valores altos de E_d , siendo 15,1 GPa, 15,6 GPa y 15,7 GPa.
- **S020 – FE02 – P067:** Por un extremo registra E_d 17,6 GPa, mientras que por el extremo contrario E_d 4,7 GPa.

La figura 4.1 muestra la diferencia que arroja el programa Portable Lumber Grader de Fakopp golpeando la probeta de madera por extremos opuesto.

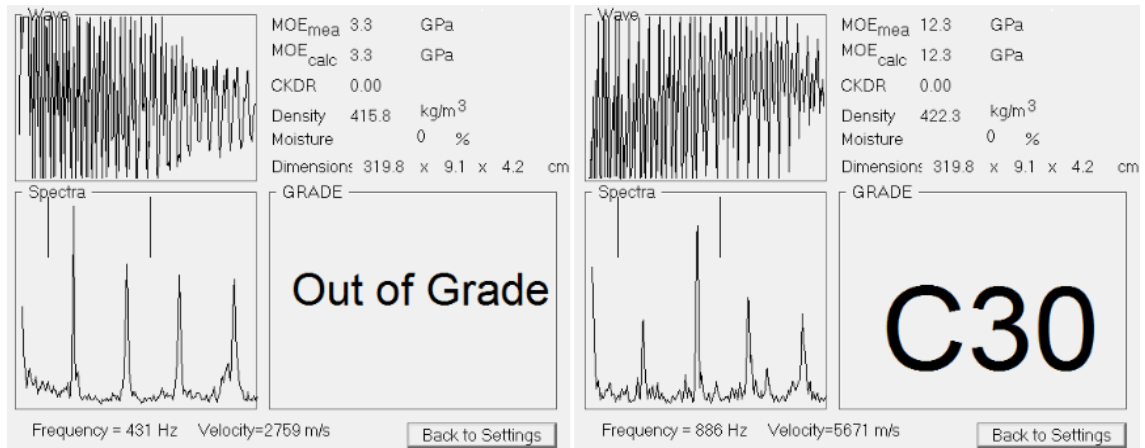


Figura 4.1: Diferencia de módulo de elasticidad dinámico por equipo Fakopp en probeta S020-FE02-P039. Fuente: Archivo propio

Otra probeta conflictiva fue la **S020 – FE02 – P057**, la cual por el equipo Timber Grader MTG siempre mostró en pantalla “ERROR”. Se repitieron en reiteradas ocasiones las mediciones, ejerciendo diferente presión, cambiando el extremo de medición, sin variar el resultado.

Todas las piezas que presentaron problemas corresponden a las clasificadas con grado estructural G2. Se analizaron con detalle estas cuatro probetas, en donde se evidencia lo mostrado en las figuras siguientes.

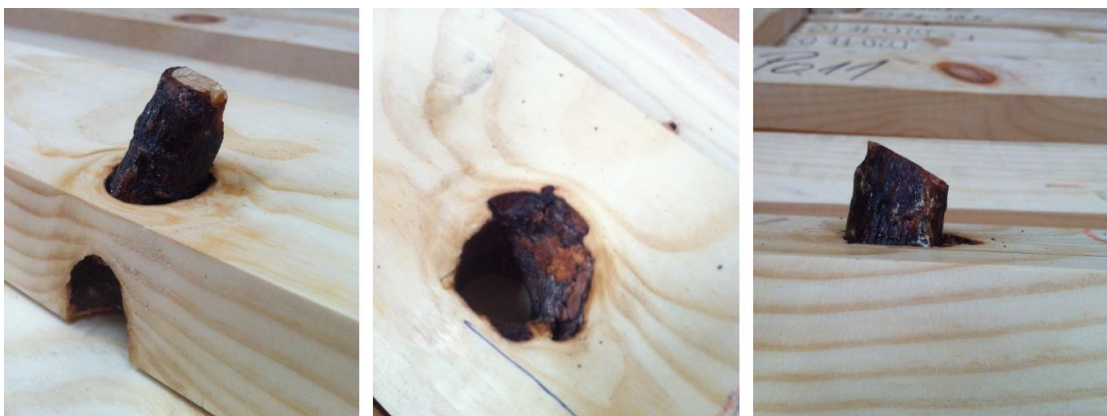


Figura 4.2: Nudos muertos de probeta S020 – FE02 – P057. Fuente: Archivo propio



Figura 4.3: Nudos de gran envergadura en probetas de Gr. Estructural G2.

Fuente: Archivo propio

Es sabido que los nudos afectan la resistencia de la madera, porque distorsionan el grano y dificultan su trabajabilidad. Los nudos son más densos porque se contraen de forma diferentes al resto de la madera. Se puede afirmar que los nudos afectan en gran medida la medición del módulo de elasticidad dinámico, sobretodo afecta mucho el tamaño de ellos, mientras mayor diámetro tengan mayor será la diferencia de los resultados obtenidos.

Se tomó la decisión de eliminar de las mediciones las cuatro probetas descritas con anterioridad. Estos números de probetas se eliminaron tanto de las de grado estructural G1 como G2, para poder realizar una comparación con la misma cantidad de datos en ambos grados estructurales. Por tanto, el estudio se realizó sobre un universo de 132 probetas.

Para ejecutar las mediciones se necesita de apoyo humano, por lo que se buscó el error asociado tanto del instrumento como de la falla producto de la manipulación.

- **Equipo Timber Grader MTG:** Se realizó el estudio de error asociado a la probeta S020 – FE01 – P002, escogida aleatoriamente. El momento exacto de medición había un 53% de humedad ambiental y una temperatura de 15.2°C. Se registraron un total de 62 mediciones para la misma probeta, en las cuales

se simula hacer lo mismo que se realizará en las 65 restantes a estudiar. Se obtiene un error asociado de $\pm 1,115\%$.

- **Equipo Portable lumber grader de Fakopp:** Se realizó el estudio de error asociado a una pieza de dimensión corta (< 2 m) y a una larga (3,20 m). El momento exacto de medición había un 57% de humedad ambiental y una temperatura de 17.3°C. Se registraron un total de 40 mediciones para ambas probetas, en las cuales se simula hacer lo mismo que se realizará en las 65 restantes a estudiar. Se obtiene un error asociado de $\pm 2.28\%$ para la probeta de menor dimensión, y un error de $\pm 1.05\%$ para mayor longitud de pieza de madera. Por lo que se puede afirmar que el error de medición aumenta a medida que disminuye la longitud de la pieza a analizar.

4.2. PROPIEDADES DE LAS PROBETAS DE MADERA

4.2.1. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

De las 132 probetas de pino ponderosa ensayadas, se muestra en la tabla 4.1 el resumen de las propiedades geométricas.

Tabla 4.1: Propiedades geométricas de probetas pino ponderosa.

Fuente: Elaboración propia

	G1			G2		
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
Máximo	3,23	91	42	3,21	91	44
Mínimo	3,20	89	41	3,20	89	41
Promedio	3,21	91	42	3,20	91	42

Las dimensiones del espesor y del ancho de las piezas de madera están expresadas en milímetros enteros, y la longitud en metros con dos decimales. Esto se hace para comprobar que las probetas ensayadas se encuentren dentro de la tolerancia que indica la norma chilena NCh 174 Of. 85 “*Maderas – Unidades empleadas, dimensiones nominales, tolerancias y especificaciones*”. Esta norma indica que para el espesor se acepta una tolerancia máxima de ± 3 mm por sobre el espesor nominal, es decir, para un espesor nominal de 41 mm, el rango para el cual se acepta la pieza es entre 38 mm y 44 mm, lo cual cumple para ambos grados estructurales, debido a que el valor mínimo registrado es de 41 mm y el máximo de 44 mm.

Para el ancho se acepta una tolerancia máxima de ± 5 mm por sobre ancho nominal, es decir, para un ancho nominal de 90 mm, el rango para el cual se acepta la pieza es entre 85 mm y 95 mm, lo cual cumple para ambos grados estructurales.

Además se puede inferir que el aserradero que provee las probetas de madera realizó un trabajo de gran calidad, lo que se ve reflejado con los promedios de largo, ancho y espesor entre los dos grados estructurales, alcanzando una muy buena exactitud.

Se afirma que los ensayos se realizaron en condiciones homogéneas en lo que respecta a las propiedades geométricas de las piezas.

4.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS

Las mediciones de las propiedades físicas como la humedad y densidad se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Propiedades físicas de probetas pino ponderosa. Fuente: Elaboración propia

	G1		G2	
	C.H. (%)	Densidad (kg/m ³)	C.H. (%)	Densidad (kg/m ³)
Máximo	14,40	495	15,73	489
Mínimo	7,77	350	10,03	344
Promedio	11,70	403	12,54	410

Los datos mostrados nos indican que las probetas clasificadas con grado estructural G1 presentan un promedio de densidad levemente menor que las de grado estructural G2, esto mismo sucede con el parámetro de contenido de humedad promedio. El mayor valor de densidad se encontró en las probetas de grado estructural G1, mientras que en las de grado estructural G2 se encuentra la probeta con mayor humedad.

4.3.MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

4.3.1. EQUIPO MTG PARA GRADO ESTRUCTURAL G1

El ensayo realizado con el equipo Timber Grader MTG entrega como resultado la densidad y módulo de elasticidad dinámico de la madera.

Para poder realizar una buena comparación es necesario tener los mismos parámetros en ambas situaciones. Es por este motivo que con las fórmulas expuestas en el apartado 2.4.3

se calculan los valores de la frecuencia natural y velocidad de propagación, obteniéndose lo mostrado en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Resultados de equipo MTG para grado estructural G1.

Fuente: Elaboración propia

	G1		
	Ed (GPa)	Velocidad propagación (m/s)	Frecuencia (Hz)
Máximo	8,15	4479,56	697,97
Mínimo	3,04	2755,53	431,09
Promedio	5,17	3559,94	555,19
Desviación estándar	1,22	402,56	62,37

Para el grado estructural G1 la diferencia entre el módulo de elasticidad dinámica es alta, siendo el máximo casi tres veces mayor que el valor mínimo registrado. La desviación estándar nos indica que en general los valores del módulo de elasticidad dinámico no están tan dispersos con respecto a la media (figura 4.4).

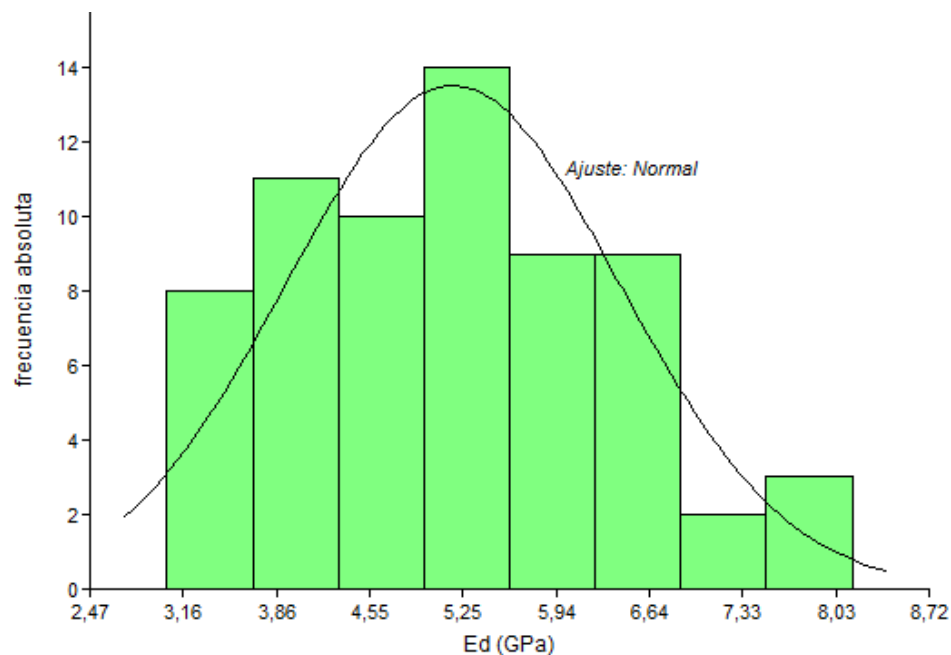


Figura 4.4: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G1 utilizando equipo MTG. Fuente: Elaboración propia.

Del histograma mostrado se aprecia que la mayor frecuencia se da para valores de módulo de elasticidad dinámico que bordean los 5,25 GPa.

Con respecto a la velocidad de propagación y frecuencia, se espera realizar una comparación con los datos obtenidos en el apartado 4.3.2 (grado estructural G2), en donde es de esperar que las velocidades disminuyan al igual que la frecuencia, debido a los defectos presentes en las piezas de madera.

Se observa además que los datos siguen una distribución de probabilidad aproximadamente normal.

4.3.2. EQUIPO MTG PARA GRADO ESTRUCTURAL G2

Al igual que en el punto anterior, la tabla 4.4 muestra los valores del módulo de elasticidad dinámico, velocidad de propagación y frecuencia para las probetas de grado estructural G2.

Tabla 4.4: Resultados de equipo MTG para grado estructural G2

Fuente: Elaboración propia

	Grado estructural G2 MTG		
	Ed (GPa)	Velocidad propagación (m/s)	Frecuencia (Hz)
Máximo	8,26	4323,98	673,73
Mínimo	3,02	2695,79	421,35
Promedio	5,06	3493,16	544,93
Desviación estándar	1,12	360,35	55,82

La diferencia entre el módulo de elasticidad dinámica es alta, siendo el máximo casi tres veces mayor que el valor mínimo registrado. La desviación estándar nos indica que en general los valores del módulo de elasticidad dinámico no están tan dispersos con respecto a la media (figura 4.5), pero en comparación con las probetas de grado G1 estos datos están levemente más homogéneos.

La velocidad tuvo una leve disminución con respecto a las probetas de grado estructural G1, por lo que puede afirmarse que la calidad de la madera influye en la propagación de la onda (como lo era de esperar). Mientras más defectos posean las piezas (nudos, bolsillos de resinas, bolsas de corteza, etc.), más tiempo requerirá la onda en ir y volver a su punto de origen, lo que se traduce en una disminución de la velocidad. Con respecto a la frecuencia se puede decir a grandes rasgos que los datos de las probetas de grado

estructural G2 se encontraron menos dispersas con respecto a la media en comparación con las de grado estructural G1.

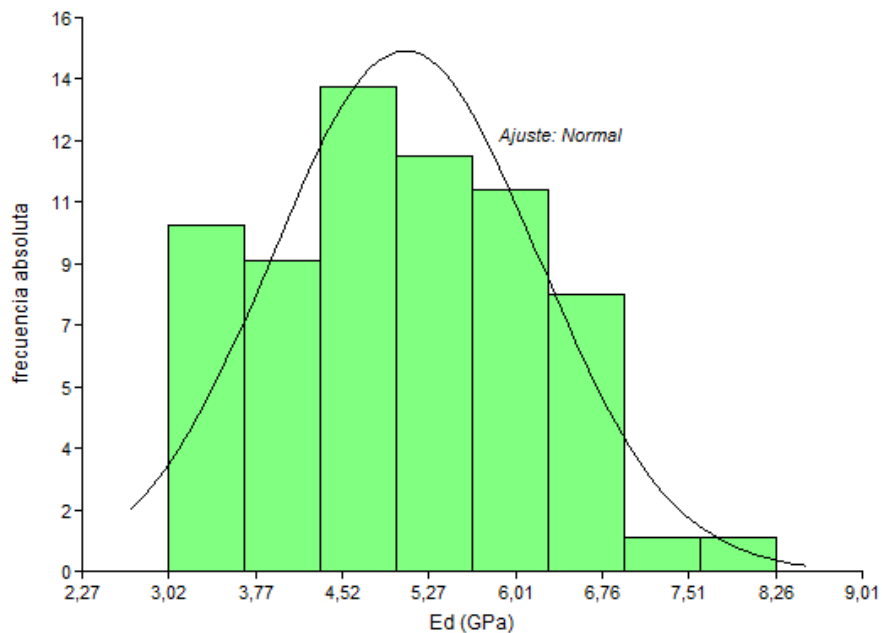


Figura 4.5: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G2 utilizando equipo MTG. Fuente: Elaboración propia

Se observa en la figura 4.5 que los datos siguen una distribución de probabilidad aproximadamente normal, además la moda de los datos bordean los 4.52 GPa, menor que la moda obtenida para probetas de grado estructural G1.

4.3.3. EQUIPO PLG DE FAKOPP PARA GRADO ESTRUCTURAL G1

Este instrumento entrega inmediatamente como resultado la frecuencia, velocidad de propagación y módulo de elasticidad dinámico, por lo que no es necesario realizar ningún cálculo. En la tabla 4.5 se muestran los resultados para probetas de grado estructural G1.

Tabla 4.5: Resultados de equipo PLG de Fakopp para grado estructural G1.

Fuente: Elaboración propia

	G1 PLG		
	Ed (GPa)	Velocidad propagación (m/s)	Frecuencia (Hz)
Máximo	7,90	4550,00	709,00
Mínimo	3,30	2729,00	426,00
Promedio	5,22	3616,37	563,55
Desviación estándar	1,11	415,03	64,33

Se observa que el valor del módulo de elasticidad dinámico máximo es poco más que dos veces mayor que el mínimo, a pesar de esto los valores no se encuentran tan dispersos con respecto de su media (figura 4.6).

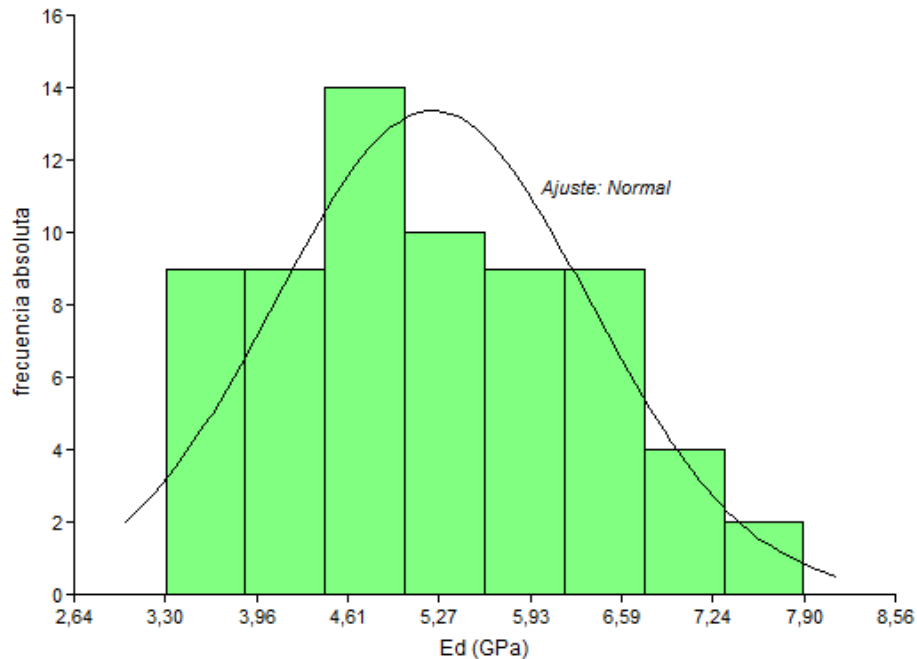


Figura 4.6: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G1 utilizando equipo PLG de Fakopp. Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre el módulo de elasticidad dinámico, frecuencia y velocidad de propagación entre los métodos de vibración acústica es muy bajo, siendo mínimas las diferencias entre un método y el otro para un mismo grado estructural.

Se observa además que los datos siguen una distribución de probabilidad aproximadamente normal, en donde la moda de los datos bordean 4.61 GPa.

4.3.4. EQUIPO PLG DE FAKOPP PARA GRADO ESTRUCTURAL G2

La tabla 4.6 muestra los valores del módulo de elasticidad dinámico, velocidad de propagación y frecuencia para las probetas de grado estructural G2 ensayadas con el equipo PLG.

Tabla 4.6: Resultados de equipo PLG de Fakopp para grado estructural G2

Fuente: Elaboración propia

	Grado estructural G2 PLG		
	Ed (GPa)	Velocidad propagación (m/s)	Frecuencia (Hz)
Máximo	7,90	4389,00	683,00
Mínimo	3,20	2751,00	430,00
Promedio	5,04	3503,09	546,11
Desviación estándar	1,01	372,81	57,71

Se observa que los datos de módulo de elasticidad dinámico se encuentran cercanos a la media de las mediciones. Los datos que están más dispersos con respecto a su promedio son los de velocidad de propagación.

La figura 4.7 muestra la gráfica de los resultados obtenidos.

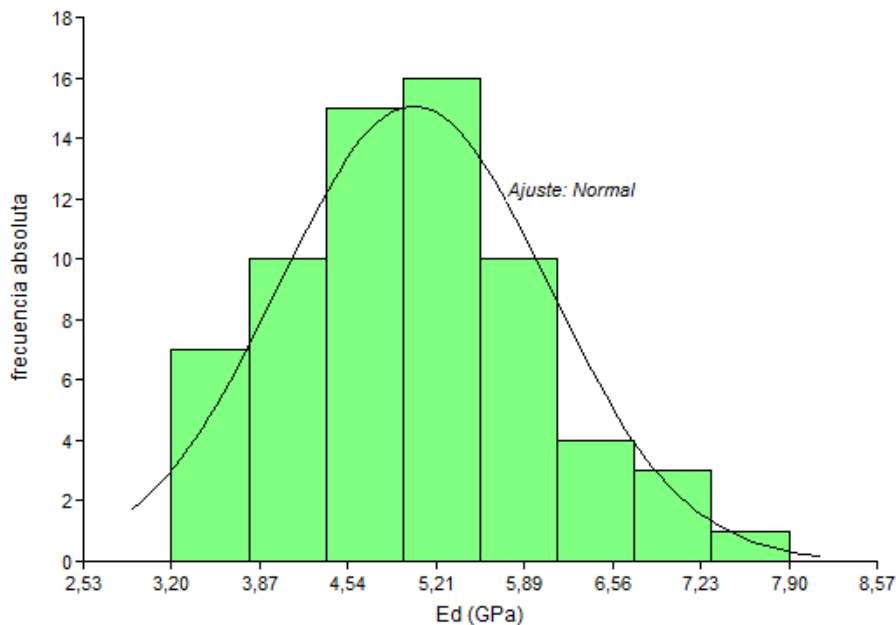


Figura 4.7: Histograma de módulo de elasticidad dinámico para grado estructural G2 utilizando equipo PLG de Fakopp. Fuente: Elaboración propia

Los tres parámetros analizados por el equipo PLG de Fakopp y MTG muestran gran similitud en los datos obtenidos, siendo sus diferencias las mínimas. Por el equipo MTG se obtuvo un promedio de módulo de elasticidad dinámico de 5.06 GPa, mientras que el equipo PLG se obtuvo un promedio de 5.04 GPa, la velocidad de propagación promedio del equipo MTG fue de $3493,16 \frac{m}{s}$, y por el PLG de $3503,09 \frac{m}{s}$, y finalmente la frecuencia promedio de MTG es de 544.93 Hz, y del equipo PLG de 546.11 Hz.

El grado estructural G2 se puede distinguir del grado G1 por la velocidad de propagación de la onda, siendo levemente menor la del grado G2. Lo que respecta al módulo de elasticidad dinámico no existe un claro contraste entre los grados estructurales.

Se observa además que los datos siguen una distribución de probabilidad aproximadamente normal.

En resumen se obtiene lo mostrado en la tabla 4.7, con respecto al módulo de elasticidad dinámico.

Tabla 4.7: Resumen del módulo de elasticidad dinámico de ambos métodos de vibración acústica.

Fuente: Elaboración propia

	Módulo de elasticidad dinámico (Ed)			
	PLG de Fakopp		MTG	
	G1	G2	G1	G2
Máximo	7,90	7,90	8,15	8,26
Mínimo	3,30	3,20	3,04	3,02
Promedio	5,22	5,04	5,17	5,06
Desviación estandar	1,11	1,01	1,22	1,12

El instrumento MTG entrega como resultado valores mayores de máximos de módulo de elasticidad dinámico en ambos grados estructurales en comparación con los resultados del equipo de Fakopp, mientras que los mínimos son menores en comparación con los mismos. Por esto se puede afirmar que el equipo de Fakopp es más conservador. Los valores obtenidos por el instrumento de Fakopp se encuentran levemente más cerca de la media que los resultantes del equipo MTG.

Entre los grados estructurales bajo el mismo equipo no existe gran variación de los resultados.

4.4.RANT Y RANB

Para la totalidad de las probetas de pino ponderosa se obtuvo su razón de área nudosa total (RANT) y razón de área nudosa en la zona de borde (RANB). Con respecto a esta última los resultados están enfocados en decir si existe condición de borde, es decir, se define si más del 50% de una zona de borde de la sección transversal crítica se encuentra ocupada por nudos (CORMA).

Tabla 4.8: Resumen de resultados de RANT para diferentes grados estructurales

Fuente: Elaboración propia

	RANT G1	RANT G2
Máximo	56,30	72,10
Mínimo	10,90	9,60
Promedio	37,17	47,25
Desv. Estandar	8,73	10,91

La tabla 4.8 muestra los valores de RANT para los grados estructurales G1 y G2, en donde se puede apreciar que los mayores valores se dan para piezas de madera con un grado estructural G2, lo cual es consistente, debido a que su catalogación corresponde al de una pieza con mayor defecto, lo que se demuestra con el valor de RANT. La figuras siguientes muestran las probetas que obtuvieron los máximos y mínimos valores (figura 4.8 y 4.9 respectivamente).



Figura 4.8: Probetas con mayor RANT de cada grado estructural

Fuente: Archivo propio.



Figura 4.9: Probetas con menor RANT de cada grado estructural

Fuente: Archivo propio.

Con respecto al RANB la tabla 4.9 muestra la cantidad de datos que tienen condición de borde.

Tabla 4.9: Números de pieza con condición de borde para cada grado estructural.

Fuente: Elaboración propia

	G1	G2
Condición de borde	36	58

De las 66 piezas del grado estructural G1 un 54,5% presenta condición de borde, mientras que las de grado estructural G2 un 87,7% presentan esta condición. Es de esperar los resultados obtenidos, debido que existe un mayor porcentaje de piezas con condición de borde en las probetas clasificadas de menor calidad.

La figura 4.10 y 4.11 muestra dos imágenes, en donde se puede apreciar una pieza con condición de borde y otra sin ella.



Figura 4.10: Probeta con condición de borde
Fuente: Archivo propio.



Figura 4.11: Probeta sin condición de borde
Fuente: Archivo propio.

4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A FLEXIÓN

4.5.1. GRADO ESTRUCTURAL G1

Para efectos del análisis se obtuvieron los resultados de módulo de elasticidad a flexión, estandarizados a 12% de contenido de humedad y admisible, mostrados en la tabla siguiente.

Tabla 4.10: Resultado del módulo de elasticidad estático a flexión para 66 probetas de grado estructural G1 (GPa). Fuente: Elaboración propia

	E_f	$E_{f,12\%}$	$E_{f12\%,10}$
Máximo	8,17	8,40	8,41
Mínimo	2,98	2,91	2,92
Promedio	5,03	5,01	5,02
Desv. Estandar	1,19	1,21	1,22

El módulo de elasticidad estático a flexión máximo es casi el triple que el valor mínimo registrando, manteniendo la misma proporción que el módulo de elasticidad dinámico. Además los valores obtenidos son semejantes a los del módulo de elasticidad dinámico para el mismo grado estructural, independiente de que instrumento se halla utilizado. Siendo más similar a los datos obtenidos por el equipo MTG.

Con respecto al módulo de elasticidad estático a flexión con un 12% de C.H. y el con 10 años de duración de carga se aprecia que son levemente mayor que el módulo obtenido experimentalmente.

La figura 4.12 muestra la frecuencia de los módulos de elasticidad a flexión.

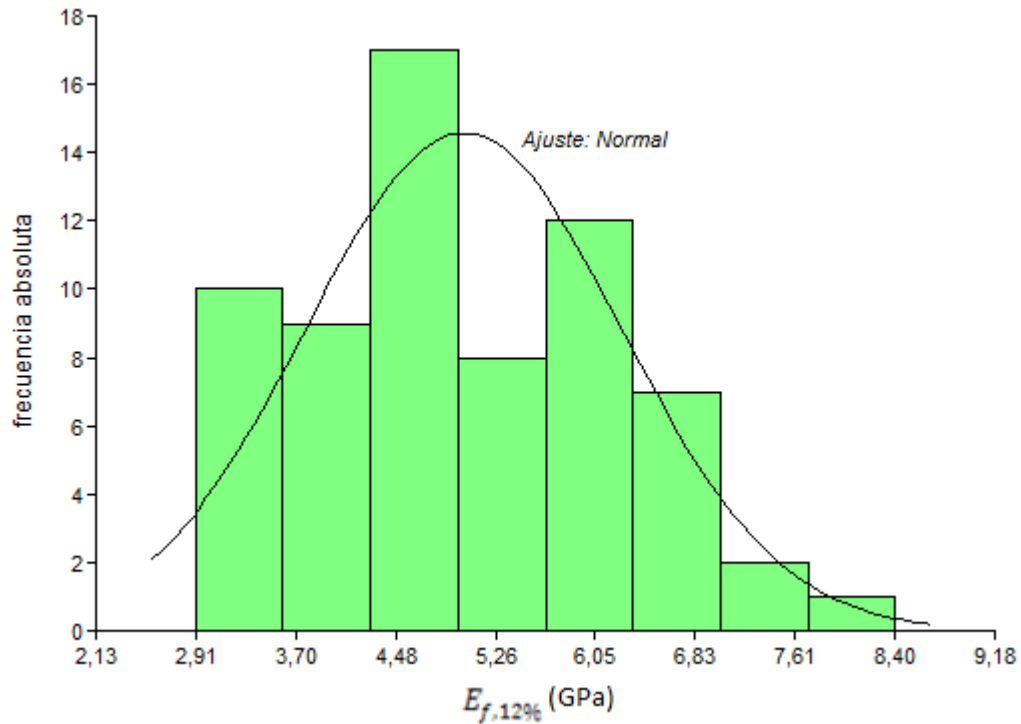


Figura 4.12: Histograma del módulo de elasticidad estático a flexión con 12% de contenido de humedad para grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

La moda del módulo de elasticidad estático a flexión bordean los 4.48 GPa. Los datos en general poseen homogeneidad. Es de esperar que para el grado estructural G2 los resultados sean menores, producto de ser una madera de menor calidad.

El módulo de elasticidad admisible para una carga distribuida uniforme corresponde al valor admisible del grado estructural estandarizado a una carga distribuida, teniendo así que el valor admisible de módulo de elasticidad para un grado estructural G1 de Pino Ponderosa es de 5,02 GPa.

Se observa además que los datos siguen una distribución de probabilidad aproximadamente normal, por lo que se asume que los resultados son fiables.

4.5.2. GRADO ESTRUCTURAL G2

La tabla 4.11 muestra los valores del módulo de elasticidad estático a flexión obtenidos experimentalmente, estandarizado a un 12% de C.H, y el admisible.

Tabla 4.11: Resultado del módulo de elasticidad estático a flexión para 66 probetas de grado estructural G2 (GPa). Fuente: Elaboración propia

	E_f	$E_{f,12\%}$	$E_{f12\%,10}$
Máximo	11,09	11,49	11,50
Mínimo	2,51	2,56	2,56
Promedio	5,13	5,18	5,19
Desv. Estandar	1,45	1,51	1,51

Se aprecia que los valores de módulo de elasticidad estandarizados a un 12% de C.H y el admisible son levemente mayores que los valores obtenidos experimentalmente.

El módulo de elasticidad admisible para una carga distribuida uniforme para un grado estructural G2 de Pino Ponderosa es de 5,19 GPa.

Los valores mínimos obtenidos para una pieza de madera de grado estructural G2 son menores en comparación con los de grado estructural G1, mientras que los valores máximos no son los esperados ya que son mayores para una pieza catalogada de menor calidad. Esto se puede explicar en base a la homogeneidad de los datos, debido a que en las piezas de grado estructural G2 los datos se encuentran más dispersos con respecto a su media (figura 4.13).

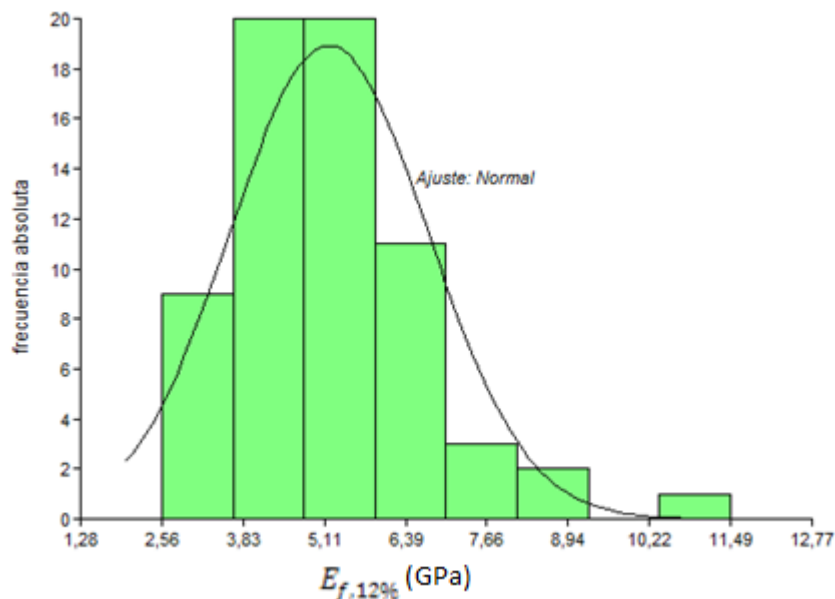


Figura 4.13: Histograma de módulo de elasticidad estático a flexión para grado estructural G2.

Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de encontrar alguna explicación del porque los resultados mayores de módulo de elasticidad estático a flexión en probetas de grado estructural G2 en comparación con los de grado estructural G1, en el histograma queda demostrado que el resultado máximo es una probeta aislada, no siendo representativa de la totalidad de la muestra.

4.6. TENSION DE ROTURA A FLEXIÓN

4.6.1. GRADO ESTRUCTURAL G1

Con los datos de la tensión de rotura experimental fue posible calcular la tensión de rotura estandarizada al 12% de contenido de humedad, y tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga, presentando estos datos en la tabla 4.12.

Tabla 4.12: Resultado de la tensión de rotura para 66 probetas de grado estructural G1 (MPa)

Fuente: Elaboración propia

	f_m	$f_{m,12\%}$	$f_{m,12\%,10}$
Máximo	50,86	50,14	23,88
Mínimo	9,62	9,62	4,58
Promedio	25,94	25,87	12,32
Desv. Estandar	9,95	9,87	4,70

Lo primero que se desprende de la tabla 4.12 son los elevados valores de la desviación estándar, lo que indica que los datos no se comportan tan homogéneamente en comparación con los módulos de elasticidad dinámico y estático. Esto se puede explicar ya que la tensión de rotura si es un indicador certero de la resistencia de un material, distinguiéndose así con mayor claridad un grado estructural de otro, esperando que las piezas de grado estructural G2 tengan valores de tensión de rotura menor.

Se observa que el valor máximo de $f_{m,12\%,10}$ es aproximadamente cinco veces mayor que el valor mínimo registrado.

En la figura 4.14 se presenta un histograma de los resultados de tensión de rotura al 12% de C.H y 10 años de duración de carga.

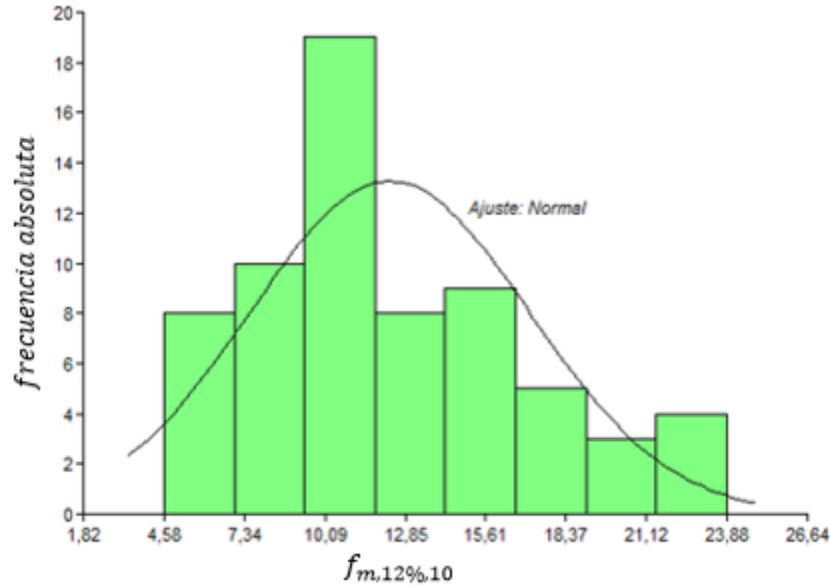


Figura 4.14: Histograma de tensión de rotura ajustado al 12% de C.H y 10 años de duración de carga para grado estructural G1 (MPa). Fuente: Elaboración propia.

Para obtener el valor admisible de la tensión de rotura, se debe considerar el percentil 5 (5%) de los datos. Así, se tiene que la tensión de rotura admisible para las probetas de grado estructural G1 de pino ponderosa fue de 5.56 MPa.

Se espera que los valores del grado estructural G2 sean menores, por tratarse de una madera de menor calidad.

Se puede apreciar en la imagen que la figura 4.14 tiende a tener una tendencia de una distribución normal.

4.6.2. GRADO ESTRUCTURAL G2

Al igual que en el apartado anterior (4.6.1) la tabla 4.13 muestra los valores de la tensión de rotura, tensión de rotura estandarizada al 12% de contenido de humedad, y tensión de rotura ajustado al 12% de C.H y 10 años de duración de carga.

Tabla 4.13: Resultado de la tensión de rotura para 66 probetas de grado estructural G2 (MPa). Fuente: Elaboración propia

	f_m	$f_{m,12\%}$	$f_{m,12\%,10}$
Máximo	52,69	53,61	25,53
Mínimo	5,87	5,87	2,80
Promedio	21,59	21,85	10,41
Desv. Estandar	10,80	11,16	5,32

Se observa que los datos de la tensión de rotura para las piezas de madera de grado estructural G2 no tienen un comportamiento homogéneo, siendo menos homogéneo que para un grado estructural G1.

Con respecto a la tensión de rotura con un 12% de humedad, se obtuvo que el valor mínimo registrado es nueve veces menor que el valor máximo. La relación mencionada es constante para los valores experimentales de la tensión de rotura y para la tensión de rotura ajustada al 12% de C.H y 10 años de duración de carga.

Para obtener el valor admisible de la tensión de rotura, se debe considerar el percentil 5 (5%) de los datos. Así, se tiene que la tensión de rotura admisible para las probetas de grado estructural G2 de pino ponderosa fue de 3.64 MPa.

Tal como se esperaba, los resultados del grado estructural G2 son menores, debido a ser una madera de menor calidad, es decir, menor resistencia y por lo mismo menor tensión de rotura.

A figura 4.15 muestra el histograma de la tensión de rotura ajustada al 12% de C.H y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2, al cual se le ajusta una función normal, para ver como es el comportamiento de la muestra de datos y obtención de la tensión de rotura admisible.

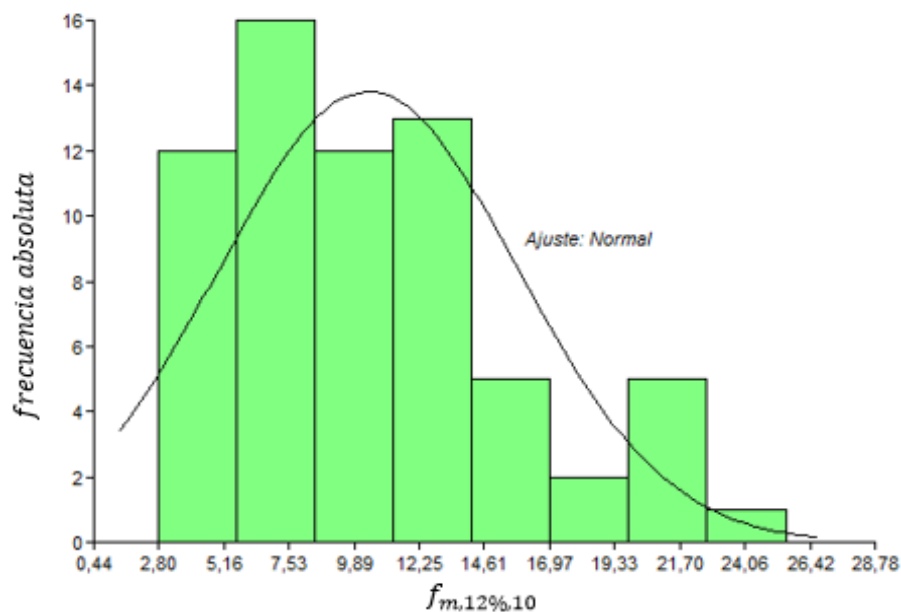


Figura 4.15: Histograma de tensión de rotura ajustada al 12% de C.H y 10 años de duración de carga para grado estructural G2 (MPa). Fuente: Elaboración propia.

La moda de los datos bordean los 7.53 MPa, mientras que el extremo derecho muestra los valores de tensión de rotura con menos frecuencia.

4.7.PROCESAMIENTO ESTADISTICO

4.7.1. ANALISIS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Una de las finalidades de este estudio es la obtención del módulo de elasticidad estático con el 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga a partir del módulo de elasticidad dinámico (obtenido por los sistemas de vibración acústicas utilizados), y la tensión de rotura a partir del módulo de elasticidad dinámico.

4.7.1.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G1

Para llevar a cabo esto se realizó una regresión mediante la creación de un diagrama de dispersión como el mostrado en la figura 4.16. Además la tabla 4.14 muestra los parámetros estadísticos correspondientes al modelo, los cuales se obtuvieron al realizar un análisis de regresión lineal con el programa InfoStat (software para análisis estadístico).

Tabla 4.14: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para E_f , 12%,10 y E_d utilizando el MTG para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
E_f , 12% adm	66	0,91	0,91	0,14	57,45	64,02

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,09	0,19	-0,30	0,48	0,48	0,6357		
E_d (GPa)	0,95	0,04	0,88	1,03	26,01	<0,0001	667,32	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	89,10	1	89,10	676,71	<0,0001
E_d (GPa)	89,10	1	89,10	676,71	<0,0001
Error	8,43	64	0,13		
Total	97,52	65			

La tabla 4.1 tiene tres partes, el encabezamiento (análisis de regresión lineal) indica cual es la variable dependiente (E_f , 12%, 10), el número de datos utilizados, N, y el coeficiente de determinación, R^2 .

La segunda parte corresponde específicamente a la estimación del modelo. En donde cost Est. indica el valor que toma la función lineal que se ajusta al diagrama de puntos cuando la variable independiente toma valor cero. El parámetro de mayor interés es la pendiente de la recta ajustada la cual se encuentra al costado derecho de la variable independiente (E_d)

La tercera parte de la salida del análisis de regresión corresponde a un análisis de la varianza para el modelo de regresión. De ella se desprenden dos cantidades, el coeficiente de determinación y el coeficiente de determinación ajustado.

Lo explicado en los párrafos anteriores es aplicado a todas las tablas siguientes que tengan el mismo formato y obtenidas del mismo software InfoStat.

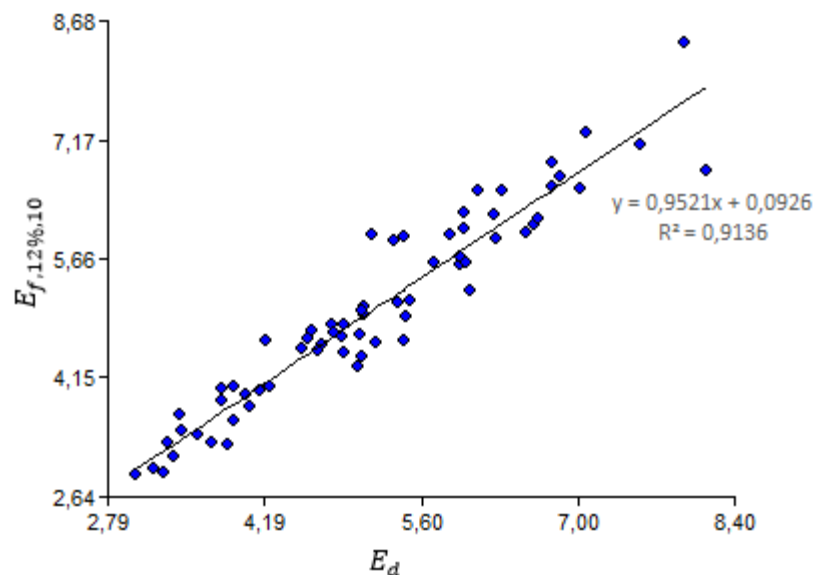


Figura 4.16: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1.

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.9136, por lo tanto, se puede afirmar que la ecuación de regresión estimada explica de forma certera la variación de las variables.

Es difícil realizar una comparación de los resultados obtenidos, debido a que los estudios que existen el Pino Ponderosa son relacionados a su crecimiento, modificación genética, ambiente para su desarrollo.

4.7.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G2

La tabla 4.15 muestra la salida de datos de análisis de regresión lineal aplicada a los datos de módulo de elasticidad admisible al 12% de contenido de humedad y módulo de elasticidad dinámico.

Tabla 4.15: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para E_f , 12%,10 y E_d utilizando el MTG para un grado estructural G2. **Fuente:** Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
E_f , 12% adm	66	0,52	0,51	1,19	199,51	206,08

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,30	0,60	-0,91	1,51	0,49	0,6234		
E_d (GPa)	0,97	0,12	0,73	1,20	8,28	<0,0001	68,58	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	77,75	1	77,75	68,62	<0,0001
E_d (GPa)	77,75	1	77,75	68,62	<0,0001
Error	72,51	64	1,13		
Total	150,26	65			

El diagrama de dispersión correspondiente a los datos mostrados en la tabla 4.15 se muestra en la figura siguiente.

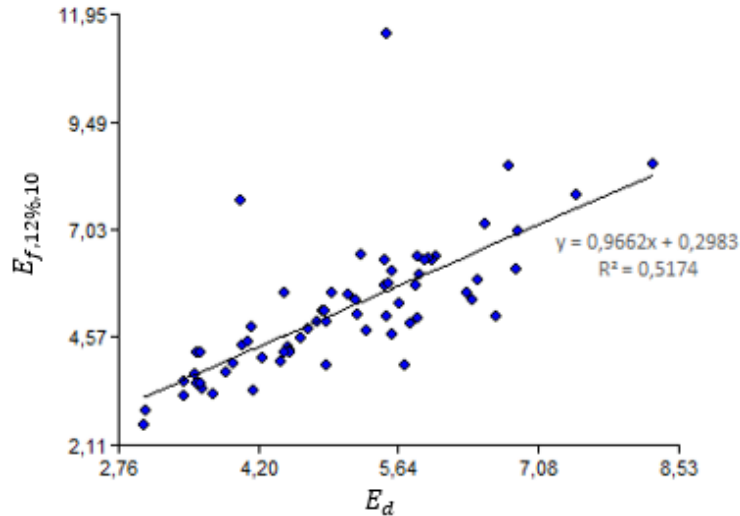


Figura 4.17: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.5174, el cual nos dice que si existe una relación lineal pero no es tan factible como la obtenida para un grado estructural G1. El coeficiente de determinación de 0.5174 significa que un 51.74% de las variables de y puede atribuirse a una relación lineal con x (E_d).

4.7.1.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G1

Al igual que los dos casos anteriores la tabla 4.16 muestra los parámetros estadísticos del análisis de regresión lineal realizado por el software InfoStat, mientras que la figura 4.18 muestra el diagrama de dispersión obtenido.

Tabla 4.16: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para E_f , 12%,10 y E_d utilizando el PLG para un grado estructural G1.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
E_f , 12% adm	66	0,88	0,87	0,20	81,28	87,85

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,32	0,26	-0,84	0,19	-1,25	0,2141		
E_d (GPa)	1,02	0,05	0,93	1,12	21,27	<0,0001	446,32	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	85,43	1	85,43	452,26	<0,0001
E_d (GPa)	85,43	1	85,43	452,26	<0,0001
Error	12,09	64	0,19		
Total	97,52	65			

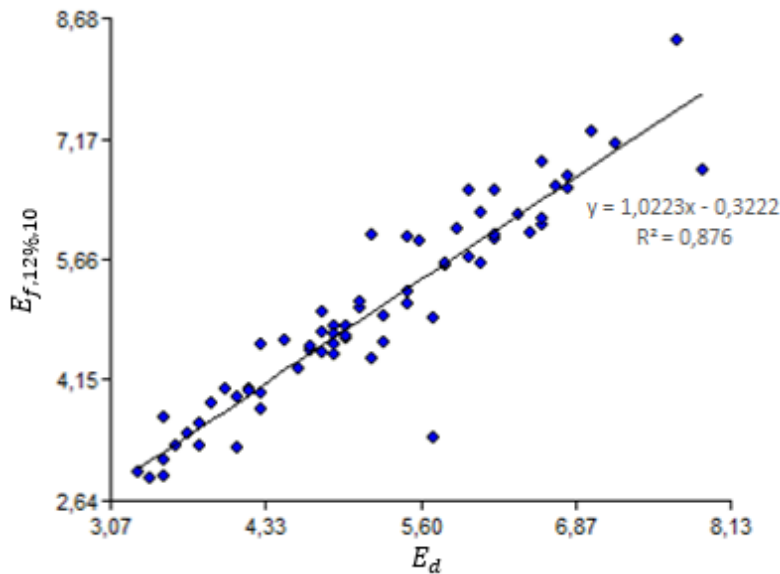


Figura 4.18: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.876, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo para predecir el comportamiento de la variable dependiente es bueno.

Se observa que los resultados obtenidos son similares a los del equipo MTG para el grado estructural G1, esto se debe a la gran similitud de los resultados obtenidos por ambos sistemas de vibración acústica (MTG de Brookhuis y PLG de Fakopp).

4.7.1.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G2

La tabla 4.17 muestra los parámetros estadísticos obtenidos al realizar un análisis de regresión lineal.

Tabla 4.17: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para E_f 12%,10 y E_d utilizando el MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
E_f , 12% adm	66	0,53	0,52	1,16	197,78	204,35

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0,32	0,66	-1,64	1,00	-0,49	0,6274		
E_d (GPa)	1,09	0,13	0,84	1,35	8,49	<0,0001	72,06	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	79,63	1	79,63	72,15	<0,0001
E_d (GPa)	79,63	1	79,63	72,15	<0,0001
Error	70,63	64	1,10		
Total	150,26	65			

La figura 4.19 muestra el diagrama de dispersión

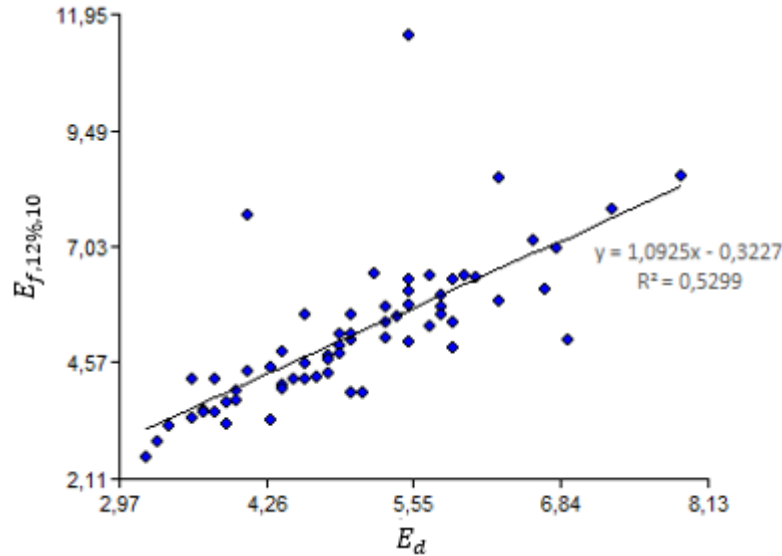


Figura 4.19: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y el módulo de elasticidad estático al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.5299, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiende a seguir una relación lineal con una capacidad explicativa media.

Se observa que los resultados obtenidos son similares a los del equipo MTG para el grado estructural G2, esto se debe a la gran similitud de los resultados obtenidos por ambos sistemas de vibración acústica (MTG de Brookhuis y PLG de Fakopp).

4.7.1.5. TENSION DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA MADERA G1

Para llevar a cabo este análisis se realizó una regresión lineal con el módulo de elasticidad dinámico (valor experimental) y la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad.

Los parámetros estadísticos del modelo de correlación se muestran en la tabla 4.18.

Tabla 4.18: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para f_m 12% ,10 y E_d utilizando el MTG para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
f_m 12% adm	66	0,24	0,23	18,51	379,26	385,83

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	2,50	2,23	-1,95	6,95	1,12	0,2664		
E_d	1,90	0,42	1,06	2,74	4,53	<0,0001	21,22	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	354,12	1	354,12	20,52	<0,0001
E_d	354,12	1	354,12	20,52	<0,0001
Error	1104,63	64	17,26		
Total	1458,76	65			

La figura 4.20 entrega el diagrama de dispersión con su respectiva línea de tendencia.

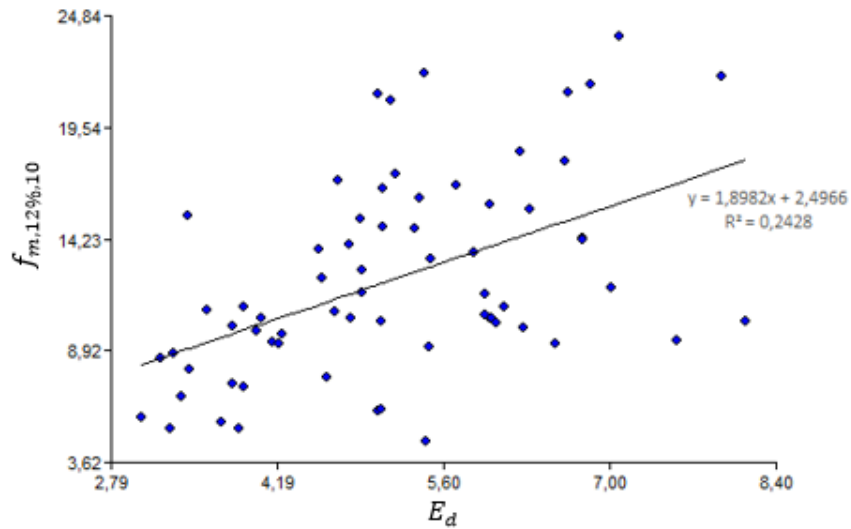


Figura 4.20: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.2428, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiene una capacidad explicativa media (según Wagner. M, 2013), debido a que el coeficiente de determinación es cercano a 0.3 (tabla anexo).

El resultado de este análisis era de esperar, ya que los datos de tensión de rotura fueron los que se ajustaron con menos exactitud a una función normal (punto 4.6). Es de suponer que los resultados del coeficiente de determinación que se obtendrán más adelante serán similares a los de este análisis.

4.7.1.6. TENSION DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR MTG PARA G2

La tabla 4.19 muestra los parámetros estadísticos del modelo de correlación lineal para fm 12% adm en función de Ed utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.

Tabla 4.19: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando el MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
fm 12% adm	66	0,38	0,37	19,49	382,75	389,32

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-4,26	2,42	-9,10	0,58	-1,76	0,0834		
Ed	2,90	0,47	1,96	3,83	6,20	<0,0001	38,88	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	699,69	1	699,69	38,45	<0,0001
Ed	699,69	1	699,69	38,45	<0,0001
Error	1164,58	64	18,20		
Total	1864,27	65			

La figura siguiente muestra el diagrama de dispersión lineal con su respectiva línea de tendencia.

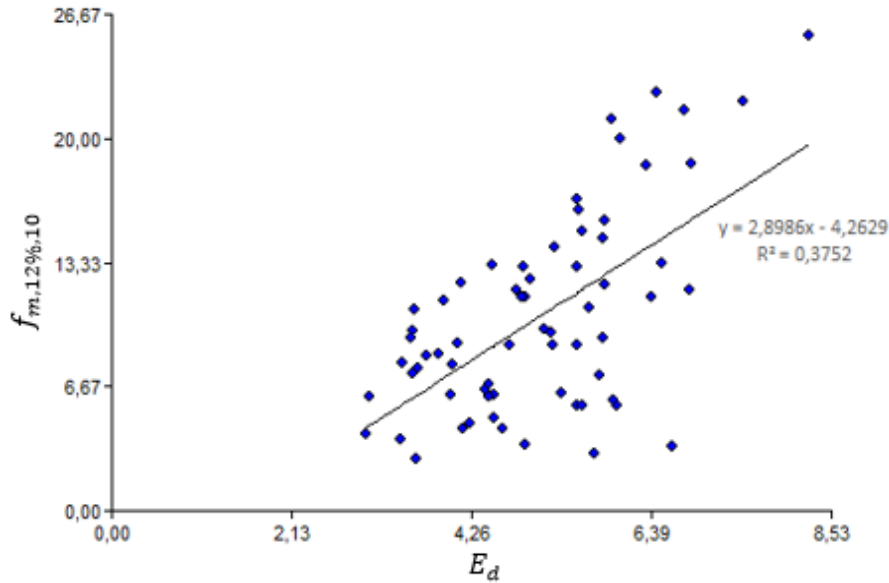


Figura 4.21: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por MTG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.3752, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiene una buena capacidad explicativa (ver tabla anexo), también se aprecia que es mejor que el dato obtenido para un grado estructural G1 utilizando el mismo método de vibración acústica (MTG de Brookhuis).

4.7.1.7. TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G1

La tabla siguiente muestra los datos de los parámetros estadísticos del modelo de correlación para f_m 12% y 10 años de duración de carga y E_d (obtenido utilizando el equipo PLG).

Tabla 4.20: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando PLG para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
fm 12% adm	66	0,25	0,24	18,26	378,40	384,96

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	1,23	2,44	-3,65	6,10	0,50	0,6170		
Ed	2,12	0,46	1,21	3,04	4,65	<0,0001	22,32	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	368,54	1	368,54	21,64	<0,0001
Ed	368,54	1	368,54	21,64	<0,0001
Error	1090,21	64	17,03		
Total	1458,76	65			

El diagrama de dispersión correspondiente a los datos otorgados por la tabla 4.20 se muestra en la figura 4.22

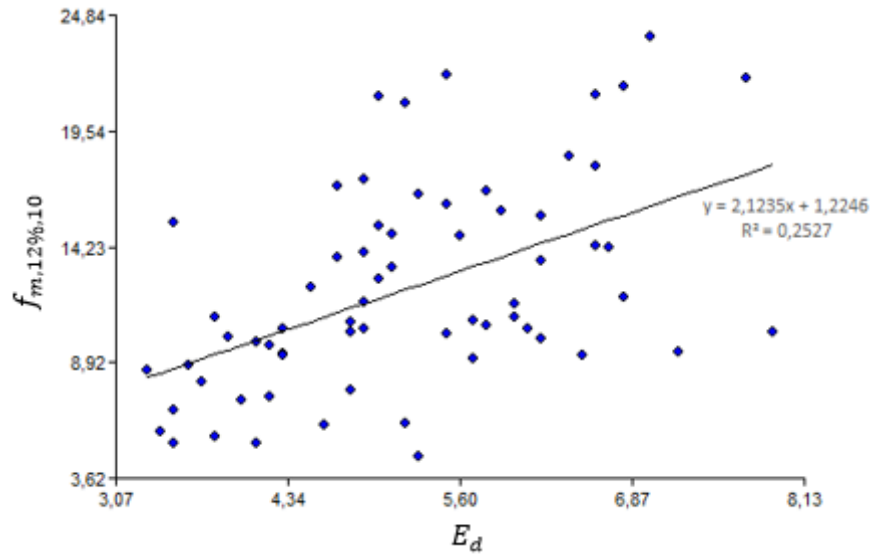


Figura 4.22: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.2527, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiene una capacidad explicativa media. El valor obtenido es muy similar al del equipo MTG para un grado estructural G1.

Se puede afirmar que entre métodos de vibraciones acústicas para el grado estructural G1 los valores son muy semejantes, lo que implica que cualquier método utilizado entregaría resultados similares.

4.7.1.8. TENSION DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELÁSTICIDAD DINÁMICO POR PLG PARA MADERA G2

Los parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm12% y 10 años de duración de carga y Ed (obtenido utilizando equipo PLG) para piezas de madera de un grado estructural G2 se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 4.21: Parámetros estadísticos del modelo de correlación para fm 12%,10 y Ed utilizando PLG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
fm 12% adm	66	0,36	0,35	20,14	384,43	391,00

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-5,57	2,72	-11,01	-0,14	-2,05	0,0446		
Ed	3,17	0,53	2,11	4,22	5,99	<0,0001	36,34	1,00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	669,67	1	669,67	35,88	<0,0001
Ed	669,67	1	669,67	35,88	<0,0001
Error	1194,60	64	18,67		
Total	1864,27	65			

La figura siguiente presenta el diagrama de dispersión correspondiente a la tabla anterior.

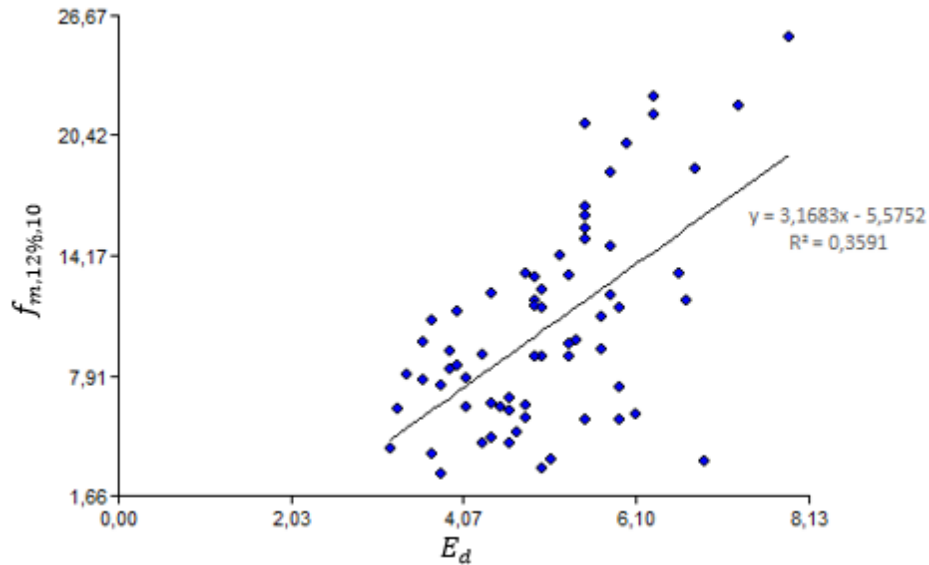


Figura 4.23: Diagrama de dispersión entre módulo de elasticidad dinámico obtenido por PLG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación obtenido es de 0.3591, por lo tanto, se puede afirmar que el modelo tiene una buena capacidad explicativa, también que el caso anterior el coeficiente de determinación es mayor a los valores obtenidos para probetas de madera de pino ponderosa de grado estructural G2. El valor obtenido es muy similar al del equipo MTG para un grado estructural G2.

Se puede afirmar al igual que en el caso anterior que entre métodos de vibraciones acústicas para el grado estructural G2 los valores son muy semejantes, lo que implica que cualquier método utilizado entregaría resultados similares.

Todo el análisis de regresión lineal realizado mostro seis resultados satisfactorios, los cuales se produjeron al hacer la correlación lineal entre el módulo de elasticidad estático al 12% de C.H y 10 años de duración de carga en función del módulo de elasticidad dinámico para probetas de grado estructural G1 y G2, y al correlacionar la tensión de rotura con el módulo de elasticidad dinámico para madera de pino ponderosa de grado estructural G2. De esta forma se puede inferir el módulo de elasticidad estático al 12% de C.H y 10 años de duración de carga y la tensión de rotura por medio de las siguientes ecuaciones.

- Para módulo de elasticidad estático por medio del equipo MTG de Brookhuis para pino ponderosa con grado estructural G1

$$y = 0.9521x + 0.0926 \quad (4.1)$$

- Para módulo de elasticidad estático por medio del equipo MTG de Brookhuis para pino ponderosa con grado estructural G2

$$y = 0.9662x + 0.2983 \quad (4.2)$$

- Para módulo de elasticidad estático por medio del equipo PLG de Fakopp para pino ponderosa con grado estructural G1

$$y = 1.0223x - 0.3222 \quad (4.3)$$

- Para módulo de elasticidad estático por medio del equipo PLG de Fakopp para pino ponderosa con grado estructural G2

$$y = 1.0925x - 0.3227 \quad (4.4)$$

- Para tensión de rotura por medio del equipo MTG de Brookhuis para pino ponderosa con grado estructural G2

$$y = 2.8986x - 4.2629 \quad (4.5)$$

- Para tensión de rotura por medio del equipo PLG de Fakopp para pino ponderosa con grado estructural G2

$$y = 3.1683x - 5.5752 \quad (4.6)$$

4.7.2. ANALISIS DE REGRESIÓN MULTIPLE

Con el fin de poder mejorar los modelos de correlación obtenidos en el apartado anterior se agrega más variables de predicción al análisis, esperando que al involucrar más datos la variable dependiente o variable respuesta coincida con los valores predichos por el modelo. Este procedimiento se realiza a los modelos que entregaron una capacidad explicativa media y baja, es decir con un coeficiente de determinación < 0.6 .

Es importante mencionar que en primera instancia se utilizaran dos variables independientes o de predicción (módulo de elasticidad dinámico y densidad), quedando la ecuación del ajuste lineal de la siguiente manera:

$$y = m_1 E_d + m_2 \rho + C \quad (4.7)$$

Donde

- m_1 : Coeficiente relacionado al módulo de elasticidad dinámico
- m_2 : Coeficiente relacionado a la densidad.
- C : Coeficiente de intercepción con el eje y.
- y : Variable dependiente o respuesta a predecir.

4.7.2.1. MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.

Se realiza el análisis de regresión múltiple por medio de tres paquetes computacionales, uno utilizando un programa de estadística (InfoStat), otro utilizando el software Microsoft Excel y finalmente la utilización de Minitab. Se realiza el mismo análisis por medio de estos tres sistemas para corroborar los resultados.

Las tablas 4.22, 4.23, 4.24 muestran los resultados obtenidos por el programa InfoStat, Microsoft Excel y Minitab respectivamente.

En las tablas se muestra solo lo necesario para definir la ecuación estimada de regresión.

Tabla 4.22: Parámetros estadísticos obtenidos por InfoStat para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Ef 12% adm	66	0,52	0,50	1,23	201,48	210,24

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0,01	1,68	-3,34	3,37	0,01	0,9943		
Densidad	8,1E-04	4,4E-03	-0,01	0,01	0,18	0,8555	2,05	1,18
Ed MTG	0,96	0,13	0,70	1,21	7,49	<0,0001	57,22	1,18

Tabla 4.23: Parámetros estadísticos obtenidos por Microsoft Excel para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación r	0,7195006
Coefficiente de determinación R ²	0,51768111
R ² ajustado	0,5023694
Error típico	1,07256951
Observaciones	66

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	0,01202515	1,67974145	0,00715893	0,99431067	-3,34467028	3,36872059	-3,34467028	3,36872059
Variable X 1	0,00081127	0,00443627	0,18287293	0,85548496	-0,0080539	0,00967645	-0,0080539	0,00967645
Variable X 2	0,95701039	0,12779894	7,48840624	2,8028E-10	0,70162459	1,2123962	0,70162459	1,2123962

Tabla 4.24: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Regression Equation

$$\text{Ef 12\% adm} = 0,012 + 0,000811 \text{ Densid} + 0,9570 \text{ Ed}$$

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	77,789	38,8947	33,81	<0,0001
Error	63	72,476	1,1504		
Total	65	150,265			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
1,07257	51,77%	50,24%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	0,012	1,680	(-3,345, 3,369)	0,01	0,9943
Densid	0,000811	0,004436	(-0,008054, 0,009676)	0,18	0,8555
Ed	0,9570	0,1278	(0,7016, 1,2124)	7,49	<0,0001

La diferencia entre los análisis de regresión es que el programa InfoStat entrega los resultados aproximados con dos decimales, mientras que Microsoft Excel con todos los

decimales, al igual que el programa Minitab, el que entrega además la ecuación de regresión. En cuanto al resultado los tres entregan un coeficiente de determinación múltiple igual a 0.51.

El coeficiente de determinación múltiple obtenido para definir el módulo de elasticidad estático ajustado al 12% de C.H y 10 años de duración de carga en función del módulo de elasticidad dinámico y densidad es igual al obtenido considerando solo una variable de predicción (E_d), es decir, es nula la diferencia en comparación con el análisis de regresión lineal realizado con anterioridad, donde se puede inferir que la densidad de las probetas ensayadas no es un factor determinante en este caso.

Con respecto a los coeficientes del módulo de elasticidad dinámico y densidad, el programa InfoStat, Microsoft Excel y Minitab entregan resultados iguales, obteniéndose la siguiente ecuación para el modelo.

$$y = 0.96 E_d + 0.0008 \rho + 0.012 \quad (4.8)$$

Debido a la similitud de los resultados entregados se opta por la utilización del programa Minitab, porque entrega los resultados de forma más clara.

4.7.2.2. MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.

Con anterioridad cuando se buscó determinar el módulo de elasticidad estático ajustado al 12% de C.H y 10 años de duración de carga en función del módulo de elasticidad dinámico se obtuvo para el modelo un coeficiente de determinación de 0.53, en base a los resultados mostrados en el punto 4.7.2.1 es de esperar que el coeficiente de determinación no varíe significativamente.

Los parámetros del análisis estadístico de la regresión múltiple se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 4.25: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para Ef 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Multiple Regression: Ef 12% adm versus Dens. Ed

Regression Equation					
Ef 12% adm = -0,869 + 0,001556 Dens + 1,0722 Ed					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	79,818	39,9088	35,69	<0,0001
Error	63	70,447	1,1182		
Total	65	150,265			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)			
1,05745	53,12%	51,63%			
Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	-0,869	1,492	(-3,850, 2,113)	-0,58	0,5626
Dens	0,001556	0,003806	(-0,006050, 0,009161)	0,41	0,6841
Ed	1,0722	0,1386	(0,7951, 1,3492)	7,73	<0,0001

En base a los datos mostrados en la tabla anterior, se concluye que no aumenta la capacidad explicativa del modelo debido a que el coeficiente de determinación múltiple se mantuvo constante. La ecuación que modela este análisis es la siguiente:

$$y = 1.07 E_d + 0.0016 \rho - 087 \quad (4.9)$$

4.7.2.3. TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G1.

Al tratar de predecir la tensión de rotura en función del módulo de elasticidad dinámico se obtuvo una capacidad explicativa media. Al considerar una variable extra se espera que el coeficiente de determinación aumente. Como se ha mostrado con anterioridad la densidad no ha sido una variable de peso en el análisis. La tabla 4.26 muestra los resultados del análisis estadístico.

Tabla 4.26: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia

Multiple Regression: fm12%adm versus Ed MTG. dens

Regression Equation

$$fm12\%adm = 4,648 + 1,9400 \text{ Ed MTG} - 0,00587 \text{ dens}$$

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	355,91	177,953	10,17	0,0001
Error	63	1102,85	17,506		
Total	65	1458,76			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
4,18397	24,40%	22,00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	4,648	7,104	(-9,548. 18,844)	0,65	0,5153
Ed MTG	1,9400	0,4420	(1,0568. 2,8233)	4,39	<0,0001
dens	-0,00587	0,01841	(-0,04265. 0,03091)	-0,32	0,7508

En el análisis de regresión múltiple el coeficiente de determinación múltiple es igual al obtenido con la regresión lineal simple, siendo cercano a 0.3, por tanto, el modelo mantiene la misma capacidad explicativa. La ecuación que describe el modelo es la siguiente:

$$y = 1.94 E_d - 0.01 \rho + 4.6 \quad (4.10)$$

4.7.2.4. TENSION DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR MTG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2.

Al igual que el caso anterior el modelo generado para determinar la tensión de rotura en función del módulo de elasticidad dinámico y la densidad de la probeta de madera no es confiable. La tabla 4.27 muestra los resultados del análisis estadístico.

Tabla 4.27: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo MTG para un grado estructural G2.

Fuente: Elaboración propia

Multiple Regression: fm 12% adm versus dens. Ed

Regression Equation
 fm 12% adm = -7,118 + 0,00809 dens + 2,8068 Ed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	703,52	351,758	19,09	<0,0001
Error	63	1160,75	18,425		
Total	65	1864,27			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
4,29239	37,74%	35,76%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	-7,118	6,722	(-20,551. 6,315)	-1,06	0,2937
dens	0,00809	0,01775	(-0,02738. 0,04357)	0,46	0,6500
Ed	2,8068	0,5114	(1,7848. 3,8289)	5,49	<0,0001

La ecuación que describe el modelo es la siguiente:

$$y = 2.81 E_d + 0.01 \rho - 7.12 \tag{4.11}$$

4.7.2.5. TENSIÓN DE ROTURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G1.

La tabla 4.28 muestra los resultados del análisis de regresión realizado por el programa Minitab.

Es de esperar que no exista gran variación entre los coeficientes de determinación simple y múltiple.

Tabla 4.28: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para fm 12%,10 en función de Ed y densidad utilizando el equipo PLG para un grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia

Multiple Regression: fm 12% adm versus dens. Ed

Regression Equation
fm 12% adm = 2,653 - 0,00396 dens + 2,1579 Ed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	369,38	184,689	10,68	0,0001
Error	63	1089,38	17,292		
Total	65	1458,76			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
4,15833	25,32%	22,95%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	2,653	6,950	(-11,236. 16,542)	0,38	0,7039
dens	-0,00396	0,01805	(-0,04004. 0,03211)	-0,22	0,8269
Ed	2,1579	0,4861	(1,1865. 3,1294)	4,44	<0,0001

El valor del coeficiente de determinación múltiple es de 0.25, el mismo valor que se obtuvo para hallar la tensión de rotura admisible en función del módulo de elasticidad dinámico. La ecuación que describe el modelo es la siguiente:

$$y = 2.16 E_d - 0.004 \rho + 2.65 \quad (4.12)$$

4.7.2.6. TENSION DE ROTURA EN FUNCION DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO POR PLG Y DENSIDAD PARA UN GRADO ESTRUCTURAL G2

La tabla 4.29 muestra los resultados del análisis de regresión múltiple realizado por medio del software estadístico Minitab.

Tabla 4.29: Parámetros estadísticos obtenidos por Minitab para f_m 12%,10 en función de E_d y densidad utilizando el equipo PLG para un grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia

Multiple Regression: fm 12% adm versus dens. Ed

Regression Equation
 f_m 12% adm = -8,843 + 0,00932 dens + 3,0466 Ed

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	676,37	338,184	17,94	<0,0001
Error	63	1187,90	18,856		
Total	65	1864,27			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
4,34229	36,28%	34,26%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value
Constant	-8,843	6,127	(-21,087, 3,401)	-1,44	0,1539
dens	0,00932	0,01563	(-0,02191, 0,04055)	0,60	0,5532
Ed	3,0466	0,5693	(1,9089, 4,1842)	5,35	<0,0001

La ecuación que describe el modelo es la siguiente:

$$y = 3.05 E_d + 0.01 \rho - 8.84 \tag{4.13}$$

La tabla 4.30 muestra un resumen de los coeficientes de determinación obtenidos de los análisis de regresión realizados, donde se muestra de forma clara el contraste que existe entre los resultados.

Tabla 4.30: Coeficientes de determinación de los análisis de regresión.

Fuente: Elaboración propia

	Coeficientes de determinación (simple y múltiple)			
	$E_{f,12\%,10}$ en función E_d	f_m 12%,10 en función E_d y dens.	$E_{f,12\%,10}$ en función E_d	f_m 12%,10 en función E_d y dens.
MTG G1	0,91	N/A	0,24	0,24
MTG G2	0,52	0,52	0,38	0,38
PLG G1	0,88	N/A	0,25	0,25
PLG G2	0,53	0,53	0,36	0,36

El análisis de regresión lineal simple arroja resultados confiables para la determinación del módulo de elasticidad estático solo cuando se analiza una madera de grado estructural G1. Mientras que las piezas de grado estructural G2 tienen coeficientes de

determinación medios, es decir, aproximadamente un 50% de la variación total de las observaciones con respecto a su media puede explicarse por su variable de predicción (E_d).

Al tratar de mejorar los modelos para predecir el módulo de elasticidad estático y la tensión de rotura no se obtienen resultados satisfactorios. Se agrega una variable de predicción extra (densidad) la cual no produce cambio significativo en los valores del coeficiente de determinación.

Debido a los resultados mostrados en la tabla 4.30 se procedió a generar un nuevo análisis de regresión múltiple, teniendo como variables de predicción el módulo de elasticidad dinámico, la densidad, y si existe o no condición de borde. Dicho análisis no presenta grandes variaciones con respecto al coeficiente de determinación, obteniéndose los siguientes resultados.

- Determinación de $E_f 12\%,10$ en función de E_d obtenido por equipo MTG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G2.

$$\text{Coef. determinación múltiple} = 0.52$$

- Determinación de $E_f 12\% ,10$ en función de E_d obtenido por equipo PLG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G2.

$$\text{Coef. determinación múltiple} = 0.53$$

- Determinación de $f_m 12\% ,10$ en función de E_d obtenido por equipo MTG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G1.

$$\text{Coef. determinación múltiple} = 0.25$$

- Determinación de $f_m 12\% ,10$ en función de E_d obtenido por equipo MTG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G2.

$$\text{Coef. determinación múltiple} = 0.38$$

- Determinación de $f_m 12\% ,10$ en función de E_d obtenido por equipo PLG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G1.

Coef. determinación múltiple = 0.26

- Determinación de $f_m 12\%,10$ en función de E_d obtenido por equipo PLG, densidad y condición de borde para probetas de madera pino ponderosa grado G2.

Coef. determinación múltiple = 0.37

4.8. GRADOS ESTRUCTURALES A PARTIR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Como se explicó en la sección 3.8.2 del capítulo 3 de este estudio al clasificar las maderas mediante una relación lineal de los parámetros E_d y $f_m 12\%,10$ caen en una de las cuatro categorías explicadas con anterioridad.

Para todos los casos que se analizaran más adelante, el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico (utilizando equipo MTG o PLG) está dado por el promedio de este parámetro. De igual forma, el límite que se establece en el eje de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad está dado por el promedio de dicha tensión. De esta forma la gráfica queda dividida en las cuatro categorías.

Con el fin de minimizar los errores en el modelo se traza una línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad.

4.8.1. EQUIPO MTG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G1

Con los resultados obtenidos del módulo de elasticidad dinámico utilizando el equipo MTG para probetas de grado estructural G1 y tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad es posible generar el siguiente modelo de correlación.

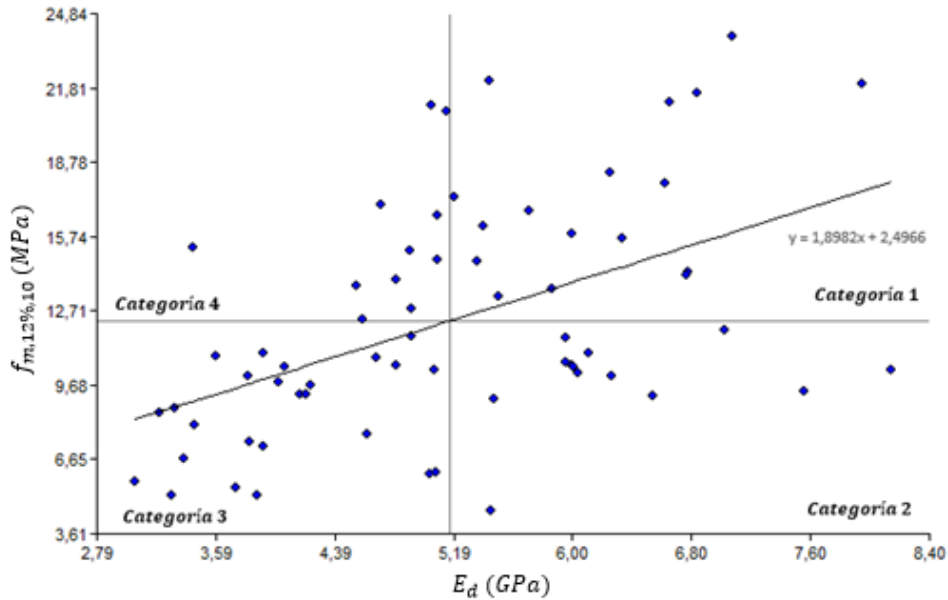


Figura 4.24: Modelo de correlación entre E_d obtenido por MTG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.24 se aprecian las cuatro categorías, en donde los límites están dados por el promedio del módulo de elasticidad dinámico (5.17 GPa) y el promedio de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad (12.32 MPa). La figura 4.25 muestra el mismo modelo con una línea de tendencia de confianza menor.

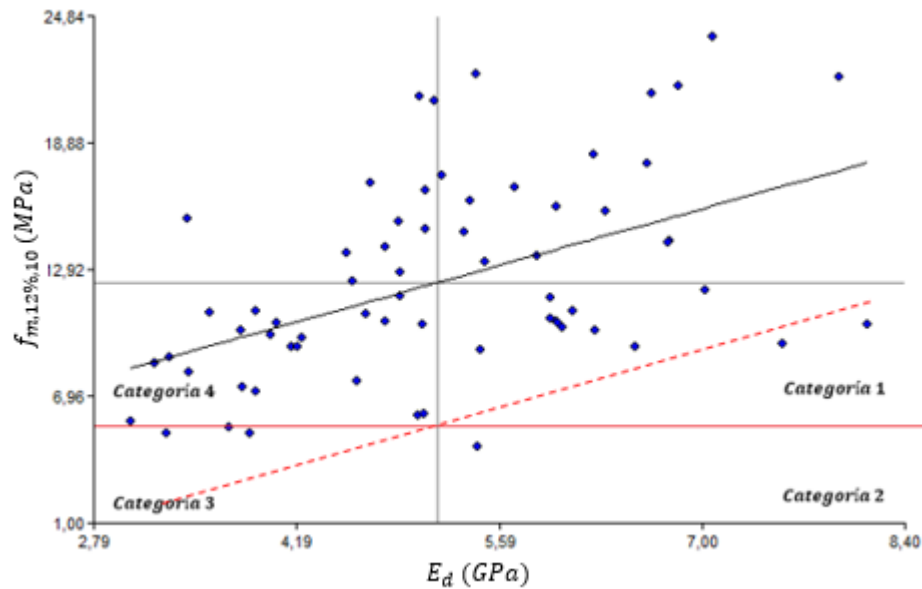


Figura 4.25: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por MTG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

Al generar una línea de tendencia de confianza menor el límite de rechazo en el eje de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad está dado por del percentil 5 de este parámetro, que es 5.56 MPa. Mientras que el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico se mantiene constante.

Es importante destacar que existe un dato dentro de la categoría 2 que se acepta de forma errónea, por lo cual existirá rechazo de las piezas de la categoría 2,3 y 4. Así, se determina que para el grado estructural G1 utilizando el equipo MTG se rechazan del grado las piezas con módulo de elasticidad dinámico menor a 5.17 GPa.

4.8.2. EQUIPO MTG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G2

Con los resultados obtenidos del módulo de elasticidad dinámico utilizando el equipo MTG para probetas de grado estructural G2 y tensión de rotura ajustada al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga es posible generar el siguiente modelo de correlación.

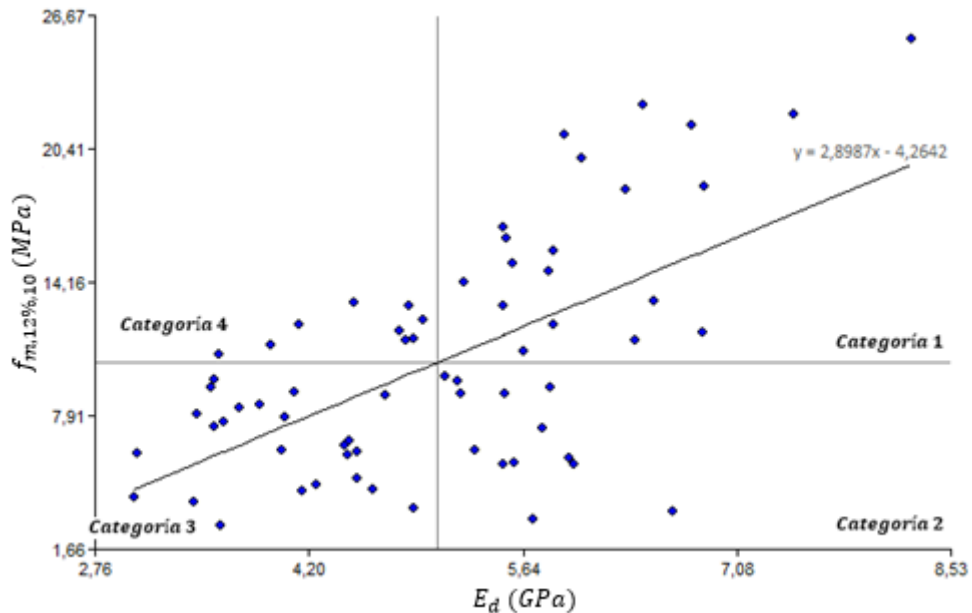


Figura 4.26: Modelo de correlación entre E_d obtenido por MTG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

Los límites de rechazo de la figura 4.26 están dados por el promedio del módulo de elasticidad dinámico (5.06 GPa), y el promedio de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga (10.41 MPa). La figura 4.27 muestra el mismo modelo con una línea de tendencia de confianza menor, en donde la línea de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico se mantiene constante, mientras que la del eje de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga está dada por el percentil 5 (tensión de rotura admisible), que es 3.64 MPa.

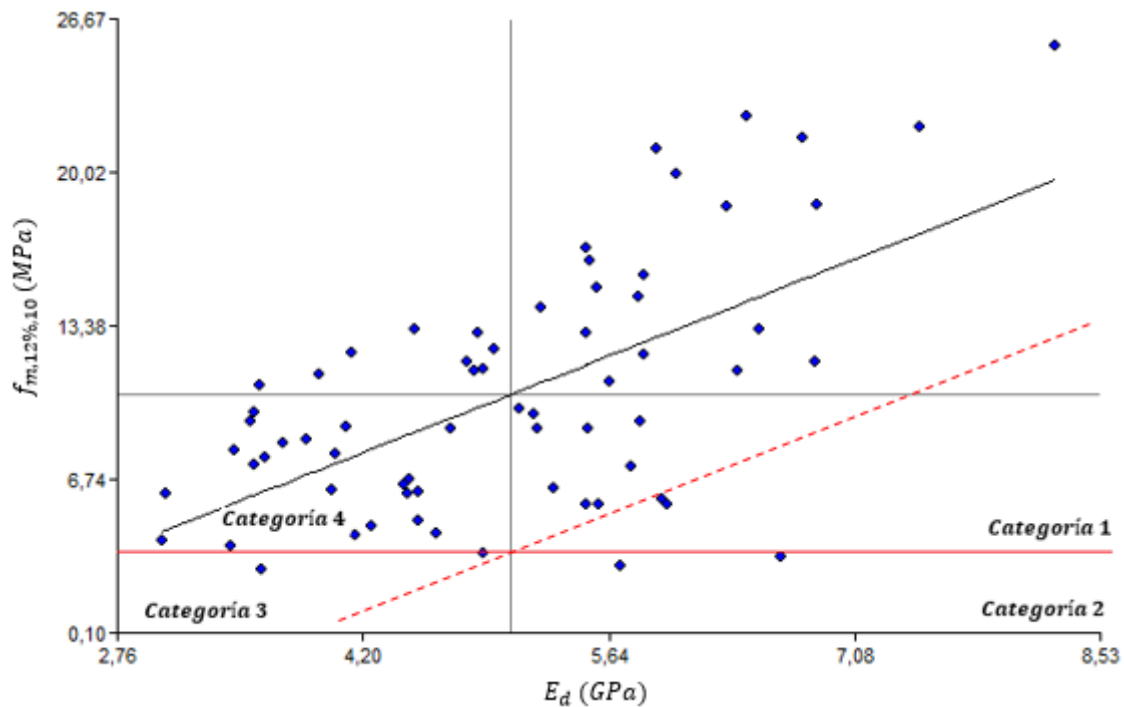


Figura 4.27: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por MTG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.27 es claro que existen dos datos que caen dentro de la categoría 2 que se acepta de forma errónea, por lo cual existirá rechazo de las piezas de la categoría 2,3 y 4. Así, se determina que para el grado estructural G2 utilizando el equipo MTG se rechazan del grado las piezas con módulo de elasticidad dinámico menor a 5.06 GPa.

4.8.3. EQUIPO PLG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G1

Al igual que los casos anteriores la figura 4.28 muestra el modelo de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico y la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad.

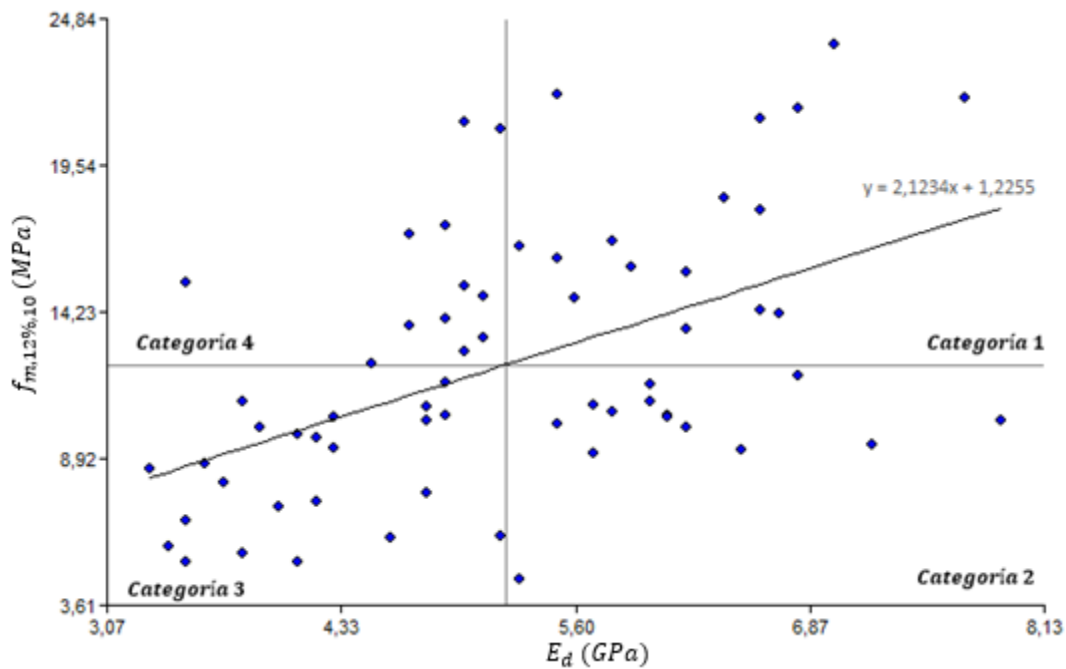


Figura 4.28: Modelo de correlación entre E_d obtenido por PLG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

Los límites de rechazos mostrados en la figura 4.28 son 5.22 GPa en el eje del módulo de elasticidad dinámico, mientras que el en eje de la tensión de rotura admisible al 12% de contenido de humedad es de 12.32 MPa.

La figura 4.29 muestra el modelo con una línea de tendencia de confianza menor (línea roja segmentada), en donde el límite de rechazo del eje de la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga está dado por 5.56 MPa (percentil 5 de $f_{m,12\%,10}$). El límite del eje del módulo de elasticidad dinámico sigue siendo el promedio de este parámetro (5.22 GPa).

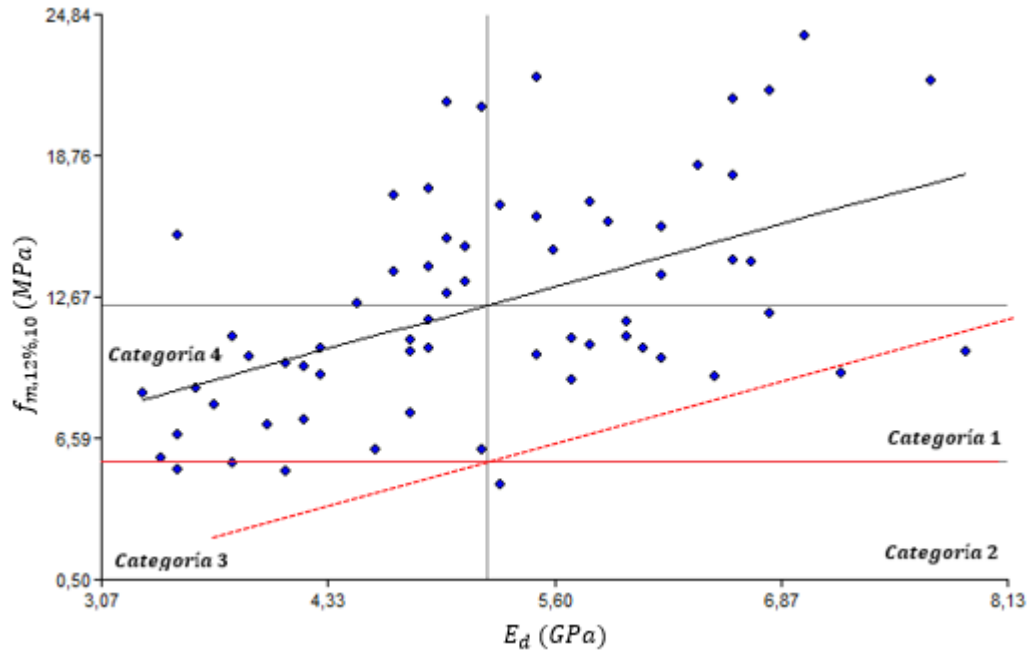


Figura 4.29: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por PLG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G1. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la gran similitud en los datos entregados por los instrumentos de vibración acústica (MTG y PLG) para un mismo grado estructural era de esperar que el modelo diera resultados similares. Se aprecia en la figura 4.29 que al igual como sucedió anteriormente para un grado estructural G1 existe un dato que cae dentro de la categoría 2 que se acepta de forma errónea, por lo cual existirá rechazo de las piezas de la categoría 2,3 y 4. Así, se determina que para el grado estructural G1 utilizando el equipo PLG se rechazan del grado las piezas con módulo de elasticidad dinámico menor a 5.22 GPa.

4.8.4. EQUIPO PLG PARA PROBETAS DE GRADO ESTRUCTURAL G2

La figura 4.30 muestra el modelo de correlación entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido por el equipo MTG y la tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga.

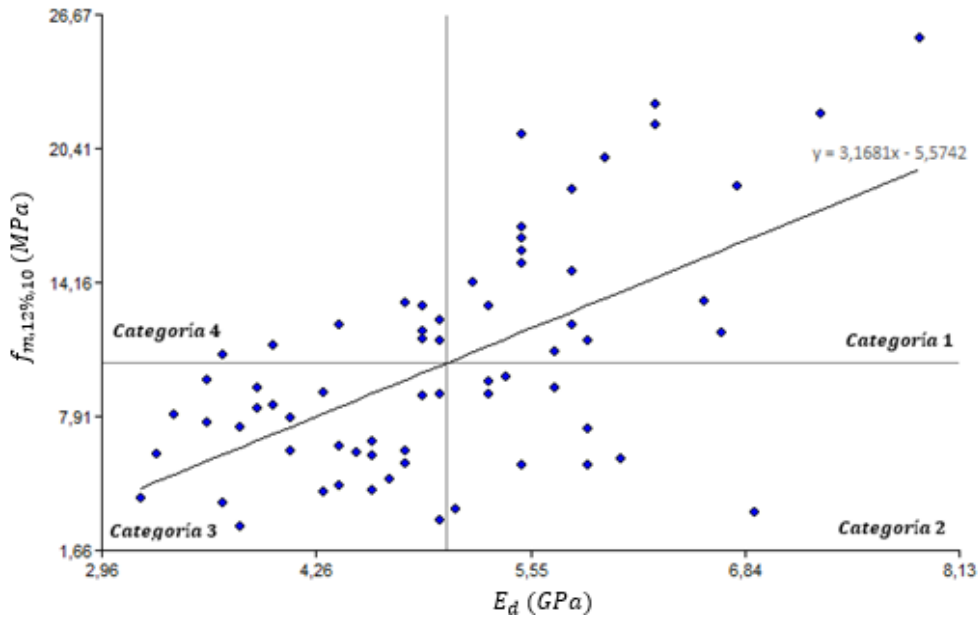


Figura 4.30: Modelo de correlación entre E_d obtenido por PLG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia en la figura anterior las cuatro categorías, las cuales están limitadas por medio de los promedios de los parámetros de los ejes (módulo de elasticidad dinámico y tensión de rotura al 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga). La figura siguiente (figura 4.31) muestra el modelo de correlación con una línea de tendencia de confianza menor (línea segmentada roja).

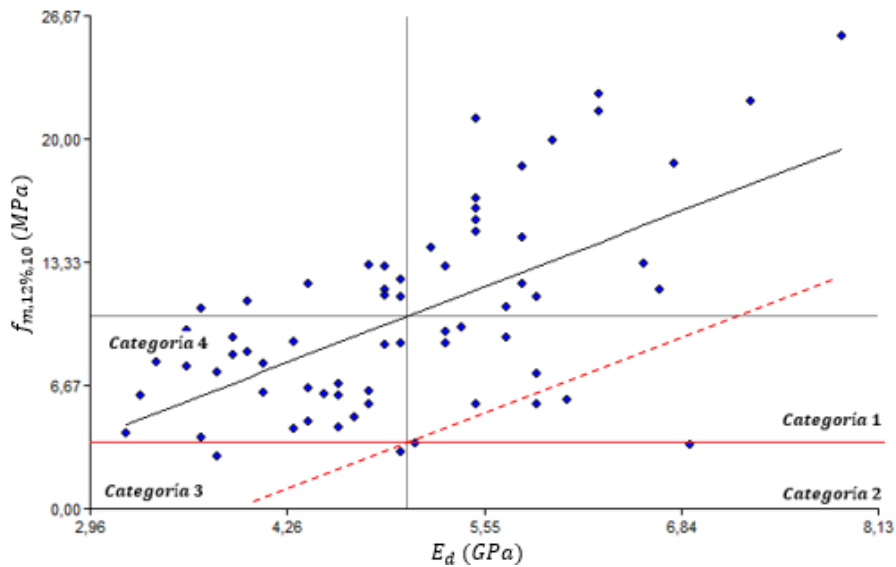


Figura 4.31: Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre E_d obtenido por PLG y $f_{m,12\%,10}$ para 66 probetas de grado estructural G2. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia en la figura 4.31 que al igual como sucedió anteriormente para un grado estructural G2 existen dos datos que caen dentro de la categoría 2 que se acepta de forma errónea, por lo cual existirá rechazo de las piezas de la categoría 2,3 y 4. Así, se determina que para el grado estructural G2 utilizando el equipo PLG se rechazan del grado las piezas con módulo de elasticidad dinámico menor a 5.04 GPa.

Es de esperar que la clasificación visual de la madera afecte al análisis recién realizado. En el anexo 1 se muestra los resultados de RANT y si la pieza posee o no condición de borde, en donde queda en evidencia que existen piezas clasificadas como grado estructural G1 que son de una calidad menor a la catalogada.

Con los datos obtenidos se puede obtener un criterio de clasificación para cada grado estructural.

Para cada grado estructural se ensayaron las piezas de madera por medio de dos métodos de vibración acústica, por tanto, se escogen los valores más conservadores para definir el criterio de clasificación, el cual será el siguiente:

- **Grado estructural G1:** Se rechazan las piezas cuando tienen un módulo de elasticidad dinámico menor o igual a 5.22 GPa.
- **Grado estructural G2:** Se rechazan las piezas cuando tienen un módulo de elasticidad dinámico menor o igual a 5.06 GPa.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los módulos de elasticidad dinámico obtenidos por ambos equipos de vibración acústica se ajustan de buena forma a una distribución normal, independiente de su grado estructural. Lo mismo ocurre para los resultados del módulo de elasticidad estático a flexión ajustado a un 12% de contenido de humedad y tensión de rotura.

En general los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos por el equipo MTG de Brookhuis y el equipo PLG de Fakopp son buenos predictores para obtener valores de módulo de elasticidad estático y tensión de rotura ajustado a un 12% de contenido de humedad y 10 años de duración de carga. Los coeficientes de determinación dan valores aceptables para la mayoría de los casos analizados, excepto cuando se busca determinar la tensión de rotura por medio del módulo de elasticidad dinámico para probetas de madera de grado estructural G1, la cual da valores menores a 0.3. Es importante mencionar que las variables de densidad y razón de área nudosa no influyen en los modelos de correlación.

Se establecen valores límites de rechazo de calidad estructural, entregando para la especie *Pinus ponderosa* Dougl. Ex Laws valores representativos del módulo de elasticidad dinámico para cada grado estructural.

De forma adicional se analizaron las razones de área nudosa total y de borde de todas las probetas, encontrando algunas en el límite de clasificación entre grado estructural G1 y G2, esto explica la gran similitud entre resultados de módulos de elasticidad dinámicos, lo cual impide una diferenciación certera entre grados estructurales.

Se recomienda el uso del equipo Timber Grader MTG de Brookhuis en casos que requiera de más portabilidad, comodidad y agilidad, en caso contrario utilizar el equipo Portable Lumber Grader de Fakopp debido a ser más conservador.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CORMA Corporación nacional de la madera (2003). Compendio de directrices para la enseñanza en ingeniería.
- Díaz, P. (2005). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Memoria de pregrado. Universidad de Talca.
- CORFO Corporación de Fomento de la Producción (2011). Caracterización de Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) para uso industrial.
- INFOR Instituto Forestal (2013). Caracterización tecnológica del pino ponderosa de Aysén. Informe técnico N°192.
- Carter, P.; Wang.; R. Ross.; D. Briggs. 2005. NDE of logs and standing tres using new acoustic tolos. Technical application and results. Washington. Publications 1-11.
- Padilla, J. (2014). Determinación de grados estructurales del *nothofagus alpina* (raulí) mediante métodos de vibraciones como herramienta no destructiva y su correlación con métodos mecánicos. Memoria de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- INN Instituto de normalización nacional (2006). NCh 3028/1 Of. 2006: Madera estructural: Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte I: Métodos de ensayo en tamaño estructural.
- INN Instituto de normalización nacional (2008). NCh 3028/2 Of. 2008: Madera estructural: Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte II: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural.

- INN Instituto de normalización nacional (1999). NCh 1970/2 Of. 1988: Maderas – Parte 2: Especies coníferas – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad.
- INN Instituto de normalización nacional (1988). NCh 176/2 Of. 2003: Determinación de la densidad.
- Pilichi, O. (2009). Aplicación del método de transmisión de pulso acústico para la obtención del módulo de elasticidad en *Pinus Radiata* (D.Don). Memoria de pregrado. Universidad Austral de Chile.
- Díaz - Vaz, Cuevas, H. (1982). Ensayos mecánicos de la madera. Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias forestales.
- Íñiguez, R. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Madrid.
- Wang, X.; R. Ross.; M. McClellan.; R. Barbour.; J. Erickson.; J. Forsman.; G.McGinnis. 2000. Strength and Stiffness Assessment of Standing Trees Using a Nondestructive Stress Wave Technique. USDA, Forest Products Laboratory
- Sanz et al, 2009. “Técnicas vibratorias aplicadas a madera estructural de Populus x euroamericana”. 5to congreso forestal español. .
- Gonzalez. M (2013). Bases de un sistema de certificación de madera para uso estructural e Chile. Memoria de magister. Universidad del Bio-Bio

ANEXOS

Tabla A.1: Datos de RANT y RANB para grado estructural G1 y G2.

	Grado estructural G1			Grado estructural G2	
	RANT	RANB		RANT	RANB
P001	32,9	SI	P001	47,8	SI
P002	13,7	NO	P002	60,8	SI
P003	27,5	NO	P003	36,6	SI
P004	20,9	NO	P004	44,9	SI
P005	10,9	NO	P005	41,34	SI
P006	30,2	NO	P006	9,6	NO
P007	34,6	SI	P007	57,69	SI
P008	40,1	NO	P008	42,3	SI
P009	26,4	NO	P009	50	NO
P010	38,5	SI	P010	39,6	SI
P011	49,5	NO	P011	59,4	SI
P012	34,1	NO	P012	54,9	NO
P013	36,3	SI	P013	38,9	SI
P014	42,4	NO	P014	46,2	SI
P015	43,4	NO	P015	39,3	SI
P016	35,2	SI	P016	66,3	SI
P017	38,6	SI	P017	42,25	SI
P018	34,3	SI	P018	47,8	SI
P019	35,7	NO	P019	63,3	NO
P020	43,9	SI	P020	46,7	SI
P021	37,2	SI	P021	35,7	NO
P022	45,1	NO	P022	53,9	SI
P023	39,6	NO	P023	48,9	NO
P024	52,7	SI	P024	40,7	SI
P025	45,6	NO	P025	40,1	SI
P026	34,2	SI	P026	41,1	SI
P027	37,4	SI	P027	55,5	SI
P028	43,96	SI	P028	43,9	SI
P029	32,97	SI	P029	54,9	SI
P030	49,5	NO	P030	57,1	SI
P031	42,3	NO	P031	64,9	SI
P032	33,5	SI	P032	52,9	SI
P033	39,6	SI	P033	34,404	SI
P034	36,3	SI	P034	38,9	SI
P035	45,1	NO	P035	54,9	SI
P036	27,5	NO	P036	62,73	SI
P037	38,5	NO	P037	29,4	SI
P038	23,72	SI	P038	55,4	SI
P040	30,8	SI	P040	40,2	SI
P041	34,84	SI	P041	55,63	SI
P042	43,96	NO	P042	72,1	SI
P043	34,1	NO	P043	48,4	SI
P044	23,1	SI	P044	36,3	SI
P045	43,8	SI	P045	36,8	SI
P046	48,4	NO	P046	56,3	SI
P047	41,8	SI	P047	29,7	SI
P048	26,4	SI	P048	50,6	SI
P049	25,8	SI	P049	55,4	SI
P050	30,8	SI	P050	57,49	SI
P052	30,7	SI	P052	29,1	SI
P053	56,3	SI	P053	54,11	NO
P054	39,01	SI	P054	50,8	SI
P055	36,8	NO	P055	37,7	SI
P056	42,3	NO	P056	46,7	SI
P058	32,97	NO	P058	52,6	SI
P059	37,7	SI	P059	50	NO
P060	42,9	SI	P060	49,5	SI
P061	46,7	SI	P061	43,9	SI
P062	31,9	SI	P062	46,7	SI
P063	34,6	SI	P063	45,1	SI
P064	34,6	SI	P064	51,6	SI
P065	50	NO	P065	48,9	SI
P066	47,3	SI	P066	43,9	SI
P068	43,9	NO	P068	24,2	SI
P069	35,2	NO	P069	37,4	SI
P070	52,7	NO	P070	66,5	SI

Tabla A.2: Correlaciones entre diferentes parámetros de la madera y su resistencia en flexión.

Fuente: Denzler, J. 2013

Parámetros de la madera	Coefficiente de correlación (R^2) con la resistencia a la flexión
Módulo de elasticidad	0,40 – 0,65
Frecuencia, velocidad de ultrasonido	0,30 – 0,55
Densidad	0,20 – 0,40
Tamaño de nudos	0,15 – 0,35
Ancho de anillos de crecimiento	0,15 – 0,35
Tamaño de nudos + Densidad	0,40 – 0,60
Tamaño de nudos + Módulo de elasticidad	0,55 – 0,75
Tamaño de nudos + Densidad + Módulo de elasticidad	0,55 – 0,80