

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil



“DETERMINACIÓN DE GRADOS DE CALIDAD C16 Y C24 DE PINO RADIATA DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO, MEDIANTE MÉTODO NO DESTRUCTIVO BASADO EN VIBRACIONES”

**ESDRAS HUICHAL SILVA**

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

**Profesor Guía**  
Marcelo González R.  
**Profesor Informante**  
Claudio Oyarzo V.

Concepción, Mayo 2017

## RESUMEN

La madera estructural es el material de construcción más ampliamente utilizado en países como Estados Unidos (90%), Canadá (95%), Suecia, Noruega, Finlandia (75-85%), Australia y Nueva Zelanda (60-70%) (INFOR. 2012b). Como contraparte, en Chile, la construcción de viviendas con estructuras de madera alcanza sólo el 20% (INFOR.2012b), situación que se explica por muchos factores, sin embargo, uno de los principales motivos es que la madera aserrada no se comercializa en forma estandarizada en cuanto a su capacidad estructural, contenido de humedad, tolerancias de dimensiones, es decir, tanto los productores como los distribuidores de materiales de construcción desconocen las características técnicas de la madera que se está comercializando.

Actualmente en Chile, la clasificación estructural de la madera se limita básicamente a técnicas de clasificación visual y en menor medida a la clasificación mecánica por medio de ensayos estáticos. Este es uno de los principales motivos por lo que se propone realizar este estudio. Aunque se utiliza un método no destructivo basado en micro vibraciones, el que se utiliza en gran parte del extranjero. En Chile, este método no ha sido masivamente utilizado, ya que no existe una correlación establecida de resultados entre los métodos mecánicos y de micro vibraciones para así asignar el grado estructural de las piezas de *Pinus Radiata*, mediante la determinación del módulo de elasticidad dinámico y su correlación con los resultados obtenidos a partir de ensayos estandarizados según la norma NCh 3028/1 Of. 2006.

Con este método, se asegura un nivel de rechazo claro y rápido, permitiendo que el proceso se realice por personal sin mucha especialización en el tema, lo cual es una ventaja respecto a la condición actual.

## ABSTRACT

Structural timber is the most widely used construction material in the United States (90%), Canada (95%), Sweden, Norway, Finland (75-85%), Australia and New Zealand (60-70%) (INFOR, 2012b).

As a counterpart, in Chile, the construction of houses with wood structures amounts to only 20% (INFOR.2012b), a situation explained by many factors, but one of the main reasons is that lumber is not commercialized in standardized in terms of structural capacity, moisture content, dimensional tolerances, that is, both producers and distributors of building materials are unaware of the technical characteristics of the wood being commercialized.

Currently in Chile, the structural classification of wood is basically limited to techniques of visual classification and to a lesser extent to mechanical classification by means of static tests. This is one of the main reasons why it is proposed to conduct this study, based on a non-destructive method based micro vibrations, which are used largely abroad. In Chile, this method is not massively used, as there is no established correlation of results between the mechanical and micro vibration methods in order to assign the structural degree of the pieces of *Pinus Radiata*, by determining the dynamic modulus of elasticity and its correlation with the results obtained from standardized tests according to norm NCh 3028/1 Of. 2006.

With this method, a clear and fast rejection level is ensured, allowing the process to be performed by personnel without much specialization in the subject, which is an advantage over the current condition.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer primeramente a Dios por estar presente en cada momento que he vivido durante mi estancia en la universidad, por darme las fuerzas para continuar con esta travesía, en segundo lugar agradecer a mi papá, mamá y hermanas, los que me han apoyado en todo momento y lo siguen haciendo, porque al final son los que siempre están y los que siempre estarán.

También agradecer a mis amigos y compañeros de universidad, por hacer más pasajero el pasar por la universidad, un gran grupo humano, a los incondicionales, JC, PC, Bruno, JP, Marco y Bascoli.

Gracias a mi profesor guía Marcelo González, por ayudarme en el proceso de la realización de la tesis, por responder las dudas en todo momento y por siempre estar dispuesto a ayudar sin mayores problemas, agradecer a toda la gente de INFOR que se portó un siete conmigo, me hicieron participe de dicha institución.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. PRESENTACIÓN DEL TEMA.....	1
1.2. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.....	2
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO.....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.....	2
1.5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	3
1.6. DELIMITACIÓN Y ALCANCES DEL ESTUDIO.....	4
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1. ESTRUCTURA DE LA MADERA.....	5
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA.....	7
2.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD.....	7
2.2.2. DENSIDAD.....	9
2.2.3. CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO DE LA MADERA.....	10
2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA.....	12
2.3.1. MODELO ORTOTRÓPICO.....	12
2.3.2. LEY DE HOOKE, MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	12
2.3.3. CARGA-ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	14
2.3.4. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	15
2.3.5. FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	17
2.4. PROPIEDADES VIBRACIONALES.....	19
2.4.1. VELOCIDAD DEL SONIDO.....	20
2.4.2. FRICCIÓN INTERNA.....	20
2.5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA.....	21
2.6. CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA.....	22
2.6.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA (citar como apunte de curso).....	22

2.6.2. CLASIFICACIÓN POR MÁQUINA .....	23
2.7. ANTECEDENTES GENERALES DEL PINO RADIATA .....	33
2.7.1. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS .....	33
2.7.2. PRODUCCIÓN Y PLANTACIONES DE PINO RADIATA A NIVEL NACIONAL.....	33
2.7.3. USOS .....	35
2.7.4. DISTRIBUCIÓN .....	35
<b>CAPÍTULO 3: MATERIALES Y EQUIPOS DE TRABAJO.....</b>	<b>37</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS, MATERIALES Y USO .....	37
3.1.1. PROBETAS DE PINO RADIATA .....	37
3.1.2. XILOHIGRÓMETRO PORTÁTIL .....	38
3.1.3. PIE DE METRO .....	39
3.1.4. CINTA MÉTRICA .....	39
3.1.5. TIMBER GRADER MTG .....	40
3.1.6. MARCO DE REACCIÓN .....	41
3.1.7. CRÓNOMETRO .....	42
3.1.8. BALANZA .....	43
3.1.9. HORNO .....	44
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO. ....</b>	<b>45</b>
4.1. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE MUESTRAS POR CADA PROVINCIA.....	45
4.2. IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS .....	47
4.3. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA MADERA....	48
4.4. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA .....	49
4.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD .....	50
4.4.2. DENSIDAD .....	53
4.5. MEDICIÓN DEL MÉTODO DE ELASTICIDAD DINÁMICO .....	54
4.5.1. USO DEL TIMBER GRADER MTG .....	54
4.6. ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS .....	59

4.6.1.	RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN FLEXIÓN.....	60
4.6.2.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS .....	62
4.6.3.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS.....	63
4.6.4.	RESISTENCIA AL CIZALLE PARALELO A LAS FIBRAS.....	65
4.7.	DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES .....	67
4.7.1.	DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN .....	67
4.7.2.	DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	73
4.7.3.	DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN .....	76
4.7.4.	DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE CIZALLE.....	79
4.8.	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE RESULTADOS .....	82
4.8.1.	ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	82
4.8.2.	DETERMINACIÓN DE GRADOS ESTRUCTURALES .....	84
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>87</b>
5.1.	MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO .....	87
5.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS .....	88
5.2.1.	RESISTENCIA A FLEXIÓN .....	88
5.2.2.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	90
5.2.3.	RESISTENCIA A CIZALLE .....	93
5.2.4.	RESISTENCIA A TRACCIÓN.....	95
5.3.	MODELO DE CORRELACIÓN DE $E_F$ , $\rho$ Y $E$ .....	98
5.4.	MODELO DE CORRELACIÓN DE $F_M$ , $\rho$ Y $E_D$ .....	103
5.5.	MODELO DE CORRELACIÓN DE $F_{(C,0)}$ , $\rho$ Y $E_D$ .....	108
5.6.	MODELO DE CORRELACIÓN DE $F_V$ , $\rho$ Y $E_D$ .....	113
5.7.	MODELO DE CORRELACIÓN DE $F_{(T,0)}$ , $\rho$ Y $E_D$ .....	118
5.8.	ELECCIÓN DEL MODELO .....	123

5.9.	GRADOS ESTRUCTURALES .....	124
5.9.1.	GRADO ESTRUCTURAL PARA $E_f$ A PARTIR DEL $E_d$ .....	124
5.9.2.	GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_m$ A PARTIR DEL $E_d$ .....	126
5.9.3.	GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_{(c,0)}$ A PARTIR DEL $E_d$ .....	128
5.9.4.	GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_v$ A PARTIR DEL $E_d$ .....	130
5.9.5.	GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_{(t,0)}$ A PARTIR DEL $E_d$ .....	132
5.10.	VALORES DE CLASIFICACIÓN.....	134
5.11.	VALORES ADMISIBLES .....	136
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES .....</b>		<b>138</b>
<b>CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>139</b>
<b>CAPITULO 8: ANEXOS .....</b>		<b>141</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b>	Correlación entre diferentes parámetros de la madera y su resistencia en flexión (Fuente: Denzler, J. 2013).....	24
<b>Tabla 2.2:</b>	Máquinas clasificadoras según sistema de medición (Fuente: Denzler, J. 2013). .....	26
<b>Tabla 2.3:</b>	Inventario de plantaciones forestales por especies, 2014. ....	33
<b>Tabla 3.1:</b>	Cantidad de probetas por cada provincia de la región del Biobío. ....	37
<b>Tabla 4.1:</b>	Constantes para el ajuste de contenido de humedad para el módulo de elasticidad estático en flexión. ....	68
<b>Tabla 4.2:</b>	Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la tensión de rotura en flexión. ....	69
<b>Tabla 4.3:</b>	Factores K para ajustar el módulo de elasticidad aparente de las vigas simplemente apoyadas. ....	70
<b>Tabla 4.4:</b>	Factores de reducción para relacionar las estadísticas experimentales con las propiedades admisibles. ....	71

<b>Tabla 4.5:</b> Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la resistencia a la compresión paralela a la fibra. ....	74
<b>Tabla 4.6:</b> Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la resistencia a la tracción paralela a la fibra. ....	77
<b>Tabla 4.7:</b> Constantes para el ajuste de contenido de humedad para resistencia al cizalle paralelo a la fibra. ....	80
<b>Tabla 5.1:</b> Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y densidad por provincias. ....	87
<b>Tabla 5.2:</b> Resultados obtenidos para el ensayo de flexión, para las distintas provincias. ....	88
<b>Tabla 5.3:</b> Resultados obtenidos para el ensayo de compresión paralela, para las distintas provincias. ....	91
<b>Tabla 5.4:</b> Resultados obtenidos para el ensayo de cizalle paralelo, para las distintas provincias. ....	93
<b>Tabla 5.5:</b> Resultados obtenidos para el ensayo de tracción paralela, para las distintas provincias. ....	96
<b>Tabla 5.6:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ y $E_f$ . ....	98
<b>Tabla 5.7:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ , densidad y $E_f$ . ....	100
<b>Tabla 5.8:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d * \rho$ y $E_f$ . ....	102
<b>Tabla 5.9:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ y $f_m$ . ....	104
<b>Tabla 5.10:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ , $\rho$ y $f_m$ . ....	105
<b>Tabla 5.11:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d * \rho$ y $f_m$ . ....	106
<b>Tabla 5.12:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ y $f_{(c,0)}$ . ....	109
<b>Tabla 5.13:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ , $\rho$ y $f_{(c,0)}$ . ....	110
<b>Tabla 5.14:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d * \rho$ y $f_{(c,0)}$ . ....	111
<b>Tabla 5.15:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ y $f_v$ . ....	114
<b>Tabla 5.16:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ , $\rho$ y $f_v$ . ....	115
<b>Tabla 5.17:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d * \rho$ y $f_v$ . ....	117
<b>Tabla 5.18:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ y $f_{(t,0)}$ . ....	119
<b>Tabla 5.19:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d$ , $\rho$ y $f_{(t,0)}$ . ....	120
<b>Tabla 5.20:</b> Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para $E_d * \rho$ y $f_{(t,0)}$ . ....	122
<b>Tabla 5.21:</b> Coeficientes de correlación. ....	123

<b>Tabla 5.22:</b> Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando el módulo de elasticidad a flexión estática. ....	126
<b>Tabla 5.23:</b> Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la flexión. ....	127
<b>Tabla 5.24:</b> Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la compresión. ....	129
<b>Tabla 5.25:</b> Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia al cizalle. ....	131
<b>Tabla 5.26:</b> Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la tracción. ....	133
<b>Tabla 5.27:</b> Rango de valores para las distintas propiedades, para los grados estructurales C16, C24. ....	134
<b>Tabla 5.28:</b> Valores máximos del módulo de elasticidad en flexión y la resistencia en flexión, para los grados estructurales C16, C24. ....	134
<b>Tabla 5.29:</b> Valores de setting para los grados estructurales, C16 y C24 respectivamente. ....	134
<b>Tabla 5.30:</b> Cantidad de piezas para cada grado estructural y su correspondiente propiedad. ....	135
<b>Tabla 5.31:</b> Valores máximos de la resistencia a tracción paralela, para los grados estructurales C16, C24. ....	135
<b>Tabla 5.32:</b> Cantidad de piezas para cada grado estructural y su correspondiente propiedad. ....	136
<b>Tabla 5.33:</b> Valores admisibles para las distintas propiedades, para el grado estructural C16. ....	137
<b>Tabla 5.34:</b> Tensiones admisibles expresadas en MPa. ....	137

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Sección transversal de un tronco.....	6
<b>Figura 2.2:</b> Rodela explicativa de contracción radial y tangencial.....	11

<b>Figura 2.3:</b> Tres ejes principales de la madera respecto a la dirección de la fibra y los anillos de crecimiento.....	12
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama Esfuerzo-Deformación.....	16
<b>Figura 2.5:</b> Diagrama del ensayo de compresión paralela.....	17
<b>Figura 2.6:</b> Apariencia de piezas de Pino radiata clasificadas en los grados estructurales de la NCh 1207.....	23
<b>Figura 2.7:</b> Esquema de funcionamiento de la máquina Cook Bolinder.....	27
<b>Figura 2.8:</b> Esquema de funcionamiento de la máquina Computermatic.....	27
<b>Figura 2.9:</b> Esquema de funcionamiento de la máquina Raute Timgrader.....	28
<b>Figura 2.10:</b> Esquema de funcionamiento de la máquina Dynagrade.....	29
<b>Figura 2.11:</b> Máquina Dynagrade.....	29
<b>Figura 2.12:</b> Máquina ViSCAN.....	30
<b>Figura 2.13:</b> Máquina de clasificación Timber Grader MTG.....	31
<b>Figura 2.14:</b> Máquina de clasificación Euro-GreComat.....	32
<b>Figura 2.15:</b> Máquina de clasificación GoldenEye.....	32
<b>Figura 2.16:</b> Madera aserrada (x1000 m3) durante los años 2013 y 2014.....	35
<b>Figura 3.1:</b> Probetas de Pino Radiata a ensayar.....	37
<b>Figura 3.2:</b> Xilohigrómetro portátil.....	38
<b>Figura 3.3:</b> Pie de metro.....	39
<b>Figura 3.4:</b> Cinta métrica utilizada.....	40
<b>Figura 3.5:</b> Timber Grader MTG.....	41
<b>Figura 3.6:</b> Marco de reacción.....	41
<b>Figura 3.7:</b> Transductor de posición y pantalla de resultados del marco de reacción.....	42
<b>Figura 3.8:</b> Cronómetro utilizado.....	43
<b>Figura 3.9:</b> Balanza Radwag WTB 200 utilizada.....	43
<b>Figura 3.10:</b> Horno Yih Der DK-600DT utilizado.....	44
<b>Figura 4.1:</b> Identificación de probetas.....	48
<b>Figura 4.2:</b> Medición de propiedades geométricas de la madera.....	49
<b>Figura 4.3:</b> Medición del contenido de humedad con el xilohigrómetro portátil.....	51
<b>Figura 4.4:</b> Método del secado en estufa.....	52

<b>Figura 4.5:</b> Testigo extraído de la probeta. ....	53
<b>Figura 4.6:</b> Encendido Timber Grader MTG. ....	55
<b>Figura 4.7:</b> Conexión mediante Bluetooth de MTG con software. ....	55
<b>Figura 4.8:</b> Conexión exitosa del MTG y software. ....	56
<b>Figura 4.9:</b> Calibración MTG. ....	56
<b>Figura 4.10:</b> Edición do nuevo lote. ....	57
<b>Figura 4.11:</b> Edición de nuevo cliente (Customer). ....	57
<b>Figura 4.12:</b> Edición Proveedor (Supplier). ....	58
<b>Figura 4.13:</b> Edición de usuario (user). ....	58
<b>Figura 4.14:</b> Configuración establecida para esta investigación. ....	59
<b>Figura 4.15:</b> Esquema de ensayo de resistencia y rigidez en flexión. ....	61
<b>Figura 4.16:</b> Aplicación del ensayo de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/1. .....	62
<b>Figura 4.17:</b> Esquema de ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras. ....	63
<b>Figura 4.18:</b> Aplicación de un ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras. ....	63
<b>Figura 4.19:</b> Esquema de ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras. ....	64
<b>Figura 4.20:</b> Aplicación de un ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras. ....	65
<b>Figura 4.21:</b> Esquema de ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras. ....	66
<b>Figura 4.22:</b> Aplicación de un ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras. ....	66
<b>Figura 4.23:</b> Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de regresión como predictor. ....	85
<b>Figura 4.24:</b> Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de confianza menor como predictor. ....	86
<b>Figura 5.1:</b> Grafico de barras, módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por provincias. ....	87
<b>Figura 5.2:</b> Grafico de barras, densidad promedio por provincias. ....	88
<b>Figura 5.3:</b> Valores promedios de resistencia a flexión paralela ( $f_m$ ), para 446 probetas. ..	89
<b>Figura 5.4:</b> Fallas registradas en las probetas sometidas a flexión paralela a la fibra. ....	90
<b>Figura 5.5:</b> Valores promedios de resistencia a compresión paralela ( $f_{(c, 0)}$ ), para 467 probetas. ....	92
<b>Figura 5.6:</b> Fallas registradas en las probetas sometidas a compresión paralela a la fibra. ....	93

<b>Figura 5.7:</b> Valores promedios de resistencia a cizalle paralelo ( $f_v$ ), para 466 probetas.....	94
<b>Figura 5.8:</b> Fallas registradas en las probetas sometidas a cizalle paralelo a la fibra.....	95
<b>Figura 5.9:</b> Valores promedios de resistencia a tracción paralela ( $f_{(t,0)}$ ), para 447 probetas. .....	97
<b>Figura 5.10:</b> Falla registrada en las probetas sometidas a tracción .....	97
<b>Figura 5.11:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ). .....	100
<b>Figura 5.12:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y $E_f$ .	103
<b>Figura 5.13:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión ( $f_m$ ). .....	105
<b>Figura 5.14:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a flexión ( $f_m$ ). .....	108
<b>Figura 5.15:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{(c,0)}$ ).....	110
<b>Figura 5.16:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{(c,0)}$ ).....	113
<b>Figura 5.17:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia al cizalle ( $f_v$ ). .....	115
<b>Figura 5.18:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_v$ ).....	118
<b>Figura 5.19:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a la tracción ( $f_{(c,0)}$ ).....	120
<b>Figura 5.20:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{(c,0)}$ ). .....	123
<b>Figura 5.22:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ). .....	124
<b>Figura 5.23:</b> Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y módulo de elasticidad a flexión estática. ....	125
<b>Figura 5.24:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a flexión ( $f_m$ ). .....	126

<b>Figura 5.25:</b> Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a flexión.....	127
<b>Figura 5.26:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la compresión ( $f_{(c,0)}$ ).....	128
<b>Figura 5.27:</b> Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a compresión. ....	129
<b>Figura 5.28:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia al cizalle ( $f_v$ ) .....	130
<b>Figura 5.29:</b> Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia al cizalle. ....	131
<b>Figura 5.30:</b> Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la tracción ( $f_{(t,0)}$ ).....	132
<b>Figura 5.31:</b> Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a la tracción. ....	133

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

### 1.1. PRESENTACIÓN DEL TEMA

La madera estructural es el material de construcción más ampliamente utilizado en países como Estados Unidos (90%), Canadá (95%), Suecia, Noruega, Finlandia (75-85%), Australia y Nueva Zelanda (60-70%) (INFOR. 2012b). Como contraparte, en Chile, la construcción de viviendas con estructuras de madera alcanza sólo el 20% (INFOR.2012b), situación que se explica por muchos factores. Sin embargo, uno de los principales motivos es que la madera aserrada no se comercializa en forma estandarizada en cuanto a su capacidad estructural, contenido de humedad y tolerancias de dimensiones. Es decir, tanto los productores como los distribuidores de materiales de construcción desconocen las características técnicas de la madera que se está comercializando.

Actualmente en Chile, la clasificación estructural de la madera se limita básicamente a técnicas de clasificación visual y en menor medida a la clasificación mecánica por medio de ensayos estáticos. Sin embargo, métodos de micro vibraciones y ultrasonido que se utilizan en gran parte del extranjero, en Chile no son masivamente utilizados, ya que no existe una correlación establecida de resultados entre los métodos mecánicos y de micro vibraciones para así asignar el grado estructural correspondiente a las piezas de madera producidas en Chile.

En el presente proyecto se determinaron los grados estructurales para el *Pinus Radiata* (Pino Radiata) a través de un método dinámico de micro vibraciones como un ensayo no destructivo. Además se estableció una relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el módulo de elasticidad estático a flexión, así como también se encontró una relación entre el módulo de elasticidad dinámico y el tensión de rotura a flexión, resistencia a compresión, resistencia a tracción y resistencia al cizalle del *Pinus Radiata*. De esta manera se logró clasificar los grados estructurales que

establece la normativa chilena vigente correspondiente a la especie, tanto con un módulo de elasticidad estático a flexión como su equivalente módulo de elasticidad dinámico.

Este proyecto se hizo posible gracias a la colaboración tanto financiera como de infraestructura del Instituto Forestal (INFOR) sede Biobío. Esta institución otorgó la totalidad del material que se ensayó y facilitó el uso del laboratorio de madera estructural (LME-INFOR), laboratorio que cuenta con la acreditación de su sistema de gestión basado en la norma ISO 1705, lo que permite el reconocimiento de sus resultados a nivel nacional e internacional.

#### 1.2. OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.

El principal objetivo de este proyecto es determinar un criterio de clasificación estructural de pino radiata proveniente de la región del Biobío en los grados de calidad C16 y C24, mediante método no destructivo basado en vibraciones acústicas.

#### 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO.

- Obtener el módulo de elasticidad aparente de piezas de pino radiata y densidad proveniente de una muestra representativa de la región del Biobío.
- Determinar propiedades mecánicas de las piezas de pino radiata de una muestra representativa de la región del Biobío.
- Realizar análisis estadístico para determinar un criterio de clasificación para obtener grados de calidad C16 y C24.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Actualmente en Chile, la clasificación estructural de la madera se limita básicamente a técnicas de clasificación visual y en menor medida a la clasificación

mecánica por medio de ensayos estáticos. Este es uno de los principales motivos por lo que se propone realizar este estudio, basado en un método no destructivo basado en micro vibraciones, el que se utilizan en gran parte del extranjero. En Chile no es masivamente utilizado, ya que no existe una correlación establecida de resultados entre los métodos mecánicos y de micro vibraciones para así asignar el grado estructural de las piezas de *Pinus Radiata*, mediante la determinación del módulo de elasticidad dinámico y su correlación con los resultados obtenidos a partir de ensayos estandarizados según la norma NCh 3028/1 Of. 2006.

Así, surge la necesidad de establecer una correlación de resultados entre los métodos mecánicos y métodos no destructivos basados en vibraciones, para asignar el grado estructural correspondiente a la pieza de madera. De esta manera las empresas forestales podrían realizar la clasificación estructural por medio de un ensayo dinámico que es mucho más eficiente que los métodos actualmente utilizados, correlacionando los resultados dinámicos obtenidos con los parámetros estáticos que se indican en las normas chilenas actuales para la asignación de los grados estructurales de la madera.

## 1.5. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

De un universo de 1846 probetas estandarizadas de *Pinus Radiata*, se realizó la medición de la escuadría y una medición del contenido de humedad, verificándose que todas cumplieran con la norma respectiva para asegurar representatividad de los resultados. Posteriormente se les determinó un módulo de elasticidad dinámico mediante una pequeña excitación dinámica originada por un golpe con un martillo en la probeta de forma longitudinal. Por medio de la frecuencia natural de la madera y la densidad del material, el instrumento denominado “*Timber Grader MTG*”, entregó el módulo de elasticidad dinámico correspondiente de cada probeta.

Posteriormente, las piezas fueron sometidas a ensayos destructivos de flexión,

tracción, compresión y cizalle, tal como lo establece la norma NCh 3028/1 Of.2006, para caracterizar sus propiedades mecánicas estáticas, como el módulo de elasticidad a flexión y la tensión de rotura. Finalmente, mediante un análisis estadístico se buscaron las correlaciones empíricas entre los módulos de elasticidad estáticos y dinámicos, así como también con la tensión de rotura, donde finalmente se establecieron rangos para la determinación del grado estructural correspondiente.

#### 1.6. DELIMITACIÓN Y ALCANCES DEL ESTUDIO

El estudio se realizó sobre un universo de 1846 probetas estandarizadas de *Pinus Radiata*. Además, la madera fue secada artificialmente, obteniéndose así un contenido de humedad promedio para todas las probetas de un 11,9%.

Se realizó el ensayo dinámico de vibraciones, ensayo mecánico destructivo de flexión, compresión, tracción y cizalle, además, de obtener los parámetros de módulo de elasticidad estática a flexión y tensión de rotura los cuales son utilizados actualmente para la determinación de los grados estructurales.

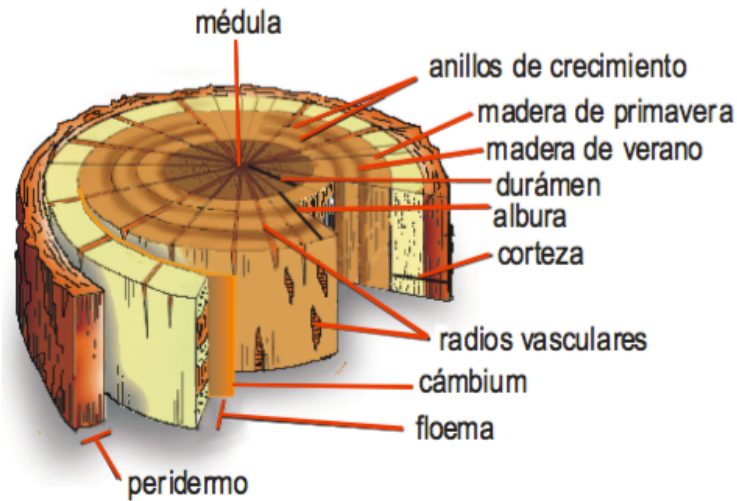
Cabe destacar que los resultados obtenidos son válidos sólo para la especie maderera *Pinus Radiata* crecidas en Chile y en estado seco, es decir, con un 11,9% de contenido de humedad promedio.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. ESTRUCTURA DE LA MADERA

La madera del tronco, raíces y ramas de los árboles está formada por el conjunto de células que forman el tejido xilemático o xilema. Lejos de tratarse de una unidad homogénea, el xilema está formado por un conjunto de células morfológicamente muy diferentes, cuya organización varía de unas especies a otras y especialmente entre coníferas y frondosas. Antes de descender a la escala microscópica, en la sección transversal del tronco de un árbol se distinguen a simple vista, o con pocos aumentos, diversas estructuras. Comenzando por el centro, podemos distinguir la médula, un conjunto de células que recorren el tronco por su eje central. La médula, que en sección transversal tiene forma poligonal o estrellada, corresponde a la zona por la que se produce el crecimiento en altura por el meristemo apical de la planta. Alrededor de la médula se van originando progresivamente los anillos de crecimiento. Cada anillo de crecimiento está formado por un conjunto inicial de células que constituyen la denominada madera temprana o madera de primavera y un conjunto final de células que originan una franja más oscura y que se conoce con el nombre de madera tardía o madera de verano. Con frecuencia, y sobre todo en los árboles de cierta edad, la parte central del tronco presenta un color más oscuro. Esta región central se conoce con el nombre de duramen y se diferencia de la corona de madera más externa, generalmente de color más claro, que constituye la albura.

Sección transversal de un tronco mostrando las principales formaciones celulares que pueden apreciarse a simple vista, ya sea de una especie conífera o latifoliada, esto se puede apreciar en la figura 2.1. Posteriormente, se describen los sectores de la sección transversal del tronco según CORMA, 2003.



**Figura 2.1:** Sección transversal de un tronco

**Fuente:** Modificado de García, C., 2005.

- Peridermo: Es la corteza exterior del tronco, su principal función es la protección. También tiene una zona cambiar, donde se producen las células que formarán la corteza.
- Floema: Es la corteza interior del tronco, su labor principal es transportar la savia elaborada por las hojas hacia el resto de los tejidos.
- Cámbium: También se le denomina Cambio. Es un tejido situado entre el Xilema y el Floema. Su función es generar células nuevas. Constituye una capa muy delgada, difícilmente distinguible a simple vista.
- Radios Vasculares: Se le conoce también con el nombre de vasos lechosos o xilema. Su función es conducir la savia bruta desde las raíces hasta las hojas.
- Albura: Zona exterior de la madera, constituida por tejido vivo, encargado de la translocación del agua, con nutrientes hacia las hojas. Corresponde al xilema activo y en muchas especies es distinguible por tener un color más claro, aunque a veces el color no es un índice fiel del xilema activo.
- Duramen: Zona hacia el interior del tronco, constituida por tejido similar a la albura, pero que está inactivo y ha sufrido un proceso de depositación de diversas sustancias en sus células, llamado duramenización.

- Anillos de crecimiento: Son anillos concéntricos a la médula, presentes en especies donde las estaciones climáticas son marcadas. Cada anillo está compuesto por una zona más clara y otra más oscura. Registra el crecimiento estacional y permite en muchas especies determinar la edad mediante su recuento. Existen anillos falsos provocados por otras causas que las estacionales.
- Médula: Tejido inactivo en el árbol adulto, que normalmente ocupa una posición central. Tiene escasas cualidades mecánicas.

## 2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

### 2.2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

La madera es un material higroscópico, es decir, tiene gran capacidad para captar y ceder agua, por lo tanto, es capaz de almacenar un importante contenido de humedad.

El peso anhidro es el peso que se obtiene cuando se coloca la madera en una estufa a 100 o 102° C, hasta que se obtiene un peso constante. Cuando el contenido de humedad es modificado, existirán variaciones dimensionales, las que se ven incrementadas mientras mayor sea la densidad de la madera.

Según Cuevas (2003) el contenido de humedad de la madera se calcula con la siguiente expresión:

$$C. H. (\%) = \frac{(P_i - P_0)}{P_0} \times 100$$

Donde;

C.H. (%): Contenido de humedad, en porcentaje.

Pi: Peso inicial [g]

Po: Peso anhidro [g]

Según Pérez (1983) y Campos et al, (1990) el contenido de humedad influye en la capacidad mecánica, es decir a menor contenido de humedad bajo el punto de saturación de las fibras (ó PSF, que corresponde a la eliminación total del agua libre del interior de las células y las paredes celulares permanecen saturadas, 28-30% C.H), en general aumenta la capacidad mecánica, es decir se incrementa la resistencia de la madera, tanto en flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular, y 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.

Los métodos existentes para determinar el contenido de humedad son, el método de pesada, método de destilación y el empleo de medidores eléctricos (Torres, 1971; NCh 176/1.Of84).

El método de secado en estufa o pesada, es el más exacto y confiable, excepto cuando se emplea en algunas maderas que contienen un porcentaje elevado de sustancias volátiles, ya que en este caso se debe utilizar otro proceso. El método de pesada consiste en pesar un trozo de madera a un contenido de humedad X, para posteriormente someterla a temperaturas de  $103 \pm 2$  °C, hasta obtener un peso constante.

Este método tiene desventajas, ya que es un método destructivo, teniendo que cortar la madera que se desea estudiar y la obtención de resultados no es inmediata, porque el tiempo mínimo requerido dependerá de la evaporación total de humedad de la madera.

Los medidores eléctricos, pueden funcionar conectados a la red eléctrica o con baterías. Posee varias ventajas, una de ellas es que no es destructivo, no siendo necesario cortar la madera para saber el contenido de humedad y es inmediato.

Una desventaja es su exactitud, ya que tienen como límite máximo un 25% de contenido de humedad de la madera (Cuevas, 2003).

El método de destilación se aplica a maderas con cualquier contenido de humedad y cualquier contenido de sustancias volátiles, el cual consiste en remover el agua de la madera mediante un solvente y su recolección por condensación en una trampa de agua, que permite medir su volumen (NCh 176/1.Of84).

## 2.2.2. DENSIDAD

La densidad es uno de los factores de mayor relevancia, ya que de ella depende en gran parte el comportamiento de la madera, su adaptabilidad a eventuales tratamientos y modificaciones, así como la posibilidad de utilización que ofrece.

La densidad se obtiene mediante el cociente de la masa y el volumen de la madera, la cual se ve directamente afectada por la humedad que la pieza de madera contenga, debido a que si la humedad aumenta esto conlleva a que el peso aumente y por consecuencia aumente la densidad (Karsulovic, 1982; Pérez, 1982; Cuevas, 2003)

$$\rho = \frac{m}{v}$$

En que:

$\rho$ : Densidad de la madera expresada en  $\text{gr}/\text{cm}^3$  ó  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

$m$ : Masa de la madera, en gramos ó kilogramos.

$v$ : Volumen de la madera, en  $\text{cm}^3$  ó  $\text{m}^3$ .

La Norma Chilena NCh176/2.Of86 modificada en 1988, hace referencia a distintos tipos de densidad.

a) **Densidad de referencia:** relación entre la masa y el volumen de la probeta, determinados ambos a un mismo contenido de humedad, para este tipo de densidad se definen.

i) **Densidad anhidra:** relación entre la masa y el volumen de la probeta en el estado anhidro.

ii) **Densidad normal:** relación entre la masa y el volumen determinados ambos a un mismo contenido de humedad igual al 12%.

b) **Densidad básica:** relación entre la masa de la probeta en estado anhidro y el volumen de la probeta en estado verde.

c) **Densidad nominal:** relación entre la masa de la probeta en estado anhidro y el volumen de la probeta al contenido de humedad en el ensayo (generalmente 12% CH).

### 2.2.3. CONTRACCIÓN E HINCHAMIENTO DE LA MADERA

Se entiende por contracción, a la disminución o pérdida de volumen de la madera, bajo el P.S.F y se expresa como porcentaje de la dimensión de la madera en estado verde (NCh 176/3.Of84).

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 (Pérez, 1983).

La contracción se produce bajo el P.S.F, donde comienza a disminuir de volumen como consecuencia del adelgazamiento de las paredes celulares al perder masa la celulosa amorfa y aproximarse unas a otras las microfibrillas. La contracción es proporcional al descenso del contenido de humedad bajo el P.S.F (Torres, 1971; Cuevas, 2003).

$$C = \frac{D_i - D_f}{D_i} \times 100$$

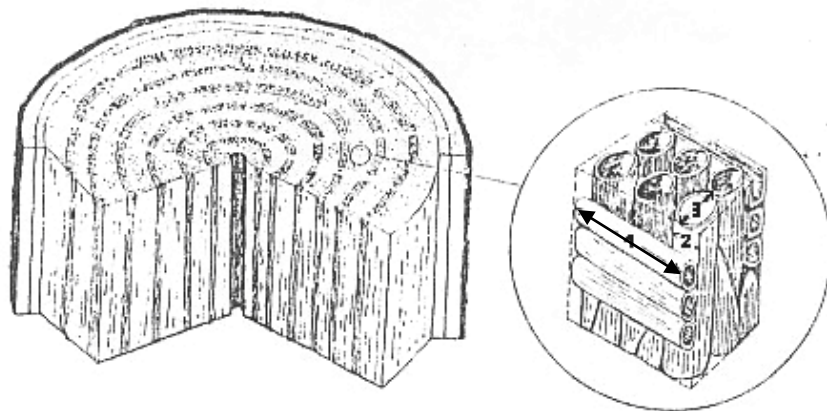
En que:

C (%): Contracción, en porcentaje.

Di: Dimensión inicial, en mm.

Df: Dimensión final, en mm.

La Contracción tangencial es mayor que la contracción radial, una de las razones para explicar este fenómeno, es el efecto restrictivo de las células horizontales de los rayos medulares. La Figura 2.2 explica las diferencias en las contracciones. En el lado derecho se aprecia muy aumentada, la disposición de las células y de los radios medulares. La flecha 1 señala el sentido radial y en este caso, un radio de tres células verticales en el sentido radial. En cambio, en el sentido tangencial (flecha 3), el diámetro de la célula vertical se contraerá sin obstáculo.



**Figura 2.2:** Rodela explicativa de contracción radial y tangencial

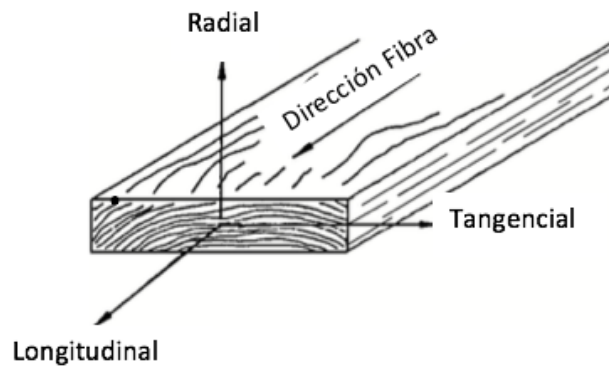
**Fuente:** Pérez, 1983.

Cabe destacar que en la mayoría de las especies la contracción radial es sólo un 50% del valor de la contracción tangencial. Proporcionalmente como un promedio de todas las especies, la contracción en las tres direcciones principales (tangencial, radial, longitudinal) tiene una razón de 100:50:1 aproximadamente (Pérez, 1983).

## 2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

### 2.3.1. MODELO ORTOTRÓPICO

La madera esta descrita por un modelo ortotrópico; es decir, esto es único e independiente de las propiedades mecánicas en las direcciones de tres ejes mutuamente perpendiculares: longitudinal, radial y tangencial. El eje longitudinal L es paralelo a la fibra; el eje radial R es normal a los anillos de crecimiento (perpendicular a la fibra en la dirección radial); y el eje tangencial T es perpendicular a la fibra pero tangente a los anillos de crecimiento (Green, D. et al, 1999). Estos ejes se muestran en la figura 2.3.



**Figura 2.3:** Tres ejes principales de la madera respecto a la dirección de la fibra y los anillos de crecimiento.

**Fuente:** Green, D. et al, 1999.

### 2.3.2. LEY DE HOOKE, MÓDULO DE ELASTICIDAD

La ley de Hooke establece que el “esfuerzo es proporcional a la deformación, hasta un determinado valor de la carga”. Esto se cumple sólo hasta el límite elástico o de proporcionalidad, es decir, si se sigue agregando carga la ley de Hooke ya no es válida (Karsulovic, 1982).

Ahora la Ley expresada matemáticamente es:

$$\sigma/\varepsilon = \text{constante} \Rightarrow E = \sigma/\varepsilon$$

A la constante de proporcionalidad se le denomina Módulo de elasticidad de un material y se designa por el símbolo E, pero para estos efectos se utilizará la sigla MOE (Karsulovic, 1982). Cuando el esfuerzo y su respectiva deformación son producidos por carga axial, la expresión del módulo de elasticidad puede ser escrita como sigue:

$$\text{MOE} = \frac{P/A}{\varepsilon/L} = \frac{P}{A} * \frac{L}{\varepsilon} : \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

El módulo de elasticidad, es una medida de la rigidez de un material. Es aquella propiedad de la materia que le permite resistir una fuerza que tiende a cambiar su forma o volumen y que es responsable de la recuperación de su forma o volumen original cuando dicha fuerza deja de actuar (Karsulovic, 1982; Pérez, 1983; Cuevas, 2003). Cabe destacar la importancia de considerar los conceptos de Rigidez y Elasticidad. *Rigidez* es la característica de un cuerpo que solicitado por cargas externas mantiene su tamaño y su forma natural o resiste a la deformación. Por el contrario, elasticidad es la característica de ciertos materiales sólidos, los cuales admiten deformaciones mientras permanezca la sollicitación externa (Díaz-Vaz y Cuevas, 1982).

Cabe señalar que el módulo de elasticidad no es una medida de resistencia y solo se aplica a condiciones dentro del límite de proporcionalidad, y se expresa en las mismas unidades que el esfuerzo unitario, ya que  $\varepsilon$  es adimensional y el MOE, toma las unidades de  $\sigma$ , es decir,  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (Karsulovic, 1982).

### 2.3.3. CARGA-ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Carga es toda fuerza externa que es aplicada sobre un miembro o estructura. Las fuerzas que resisten a las cargas son fuerzas internas que se desarrollan en un cuerpo cargado, denominadas tensiones internas (Véliz, 2003). Una fuerza puede ser medida en kilogramo (o en cualquier otra unidad de peso o fuerza).

A la tensión interna referida a una unidad de área resistente en una sección transversal de un cuerpo se le denomina esfuerzo unitario y queda expresado por:

$$\text{Esfuerzo unitario } (\sigma) = P/A,$$

Donde;

P: Es la carga.

A: Es el área de la sección.

En todos los materiales, los esfuerzos que actúan sobre un cuerpo producen un cambio de forma y tamaño. La distorsión que resulta del esfuerzo aplicado se conoce como deformación unitaria ( $\epsilon$ ) (Karsulovic, 1982; Cuevas, 2003). La deformación es medida en milímetro (o en cualquier unidad lineal).

$$\text{Deformación } (\epsilon) = \delta / l,$$

Donde;

$\delta$ : Es la deformación total.

l: Corresponde al largo del cuerpo en la dirección en el cual actúa la fuerza (Véliz, 2003).

Pérez (1983) define algunos conceptos básicos:

Deformación: desplazamiento de las partículas de un material, como resultado de la

aplicación de una carga externa sobre él.

Fuerza externa: representa cualquier sollicitación que, actuando exteriormente, altere la forma y/o dimensión del material.

Límite de proporcionalidad: punto del gráfico carga - deformación, en el cual la curva se desvía de la línea recta inicial (ver figura 2.4).

Módulo de elasticidad: medida de la resistencia a la deformación axial de la probeta de ensayo cuando se la somete a una carga en dirección paralela a las fibras de la madera. Se determina como la pendiente de la zona lineal del gráfico carga – deformación por debajo del límite de proporcionalidad.

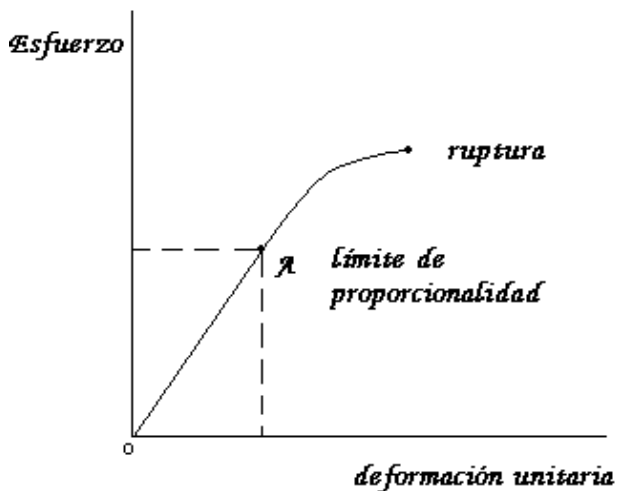
Tensión máxima ó de rotura: es aquella que se determina con la carga máxima soportada por el cuerpo y se verifica cuando la carga que se aplica, más allá del límite elástico, provoca la rotura en el cuerpo.

Tensión unitaria: es el esfuerzo que soporta un cuerpo por unidad de superficie.

Tensión en el límite de proporcionalidad: carga unitaria máxima a que se puede someter un material sin que se produzcan deformaciones permanentes.

#### 2.3.4. DIAGRAMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

En la figura 2.4 se puede observar la relación que existe entre los incrementos de carga o esfuerzo a que se ve sometido un cuerpo (eje de las ordenadas) y sus correspondientes aumentos de deformación (eje de las abscisas). La línea resultante está formada por una recta hasta el límite elástico del material ensayado. Al seguir aumentando la carga se obtiene la ruptura del material (Pérez, 1983).

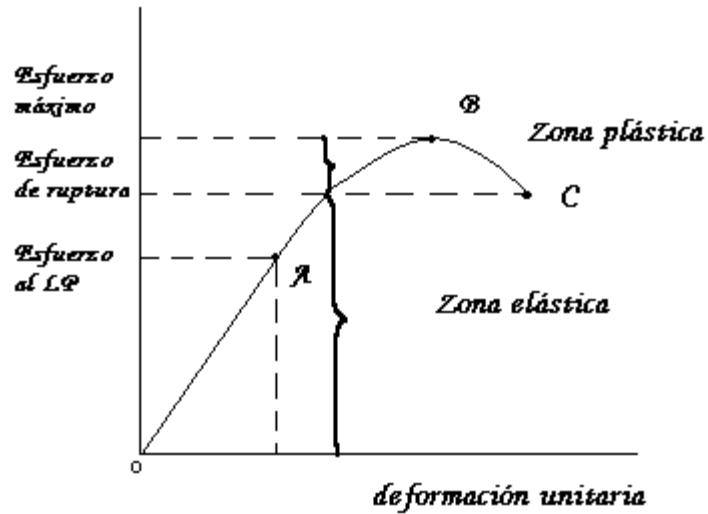


**Figura 2.4:** Diagrama Esfuerzo-Deformación.

**Fuente:** Pérez, 1983.

Según Karsulovic (1982), cuando un cuerpo es aplastado o es cargado, este llega hasta un límite llamado Límite de Proporcionalidad, hasta este punto el cuerpo puede volver a recuperar su estado original, cuando la carga es suprimida, ésta zona es denominada con el nombre de zona elástica. Si se sigue aumentando la carga el material quedará permanentemente deformado, a esta zona se le denomina, zona plástica. En esta zona la carga y la deformación unitaria siguen creciendo, pero ahora la deformación sigue creciendo con mayor rapidez, (parte A – B de la curva de la figura 2.5), hasta alcanzar un esfuerzo máximo llamado también resistencia o esfuerzo máximo (punto B, de la figura 2.5). El punto C de la misma figura, corresponde a la tensión máxima o de rotura del material.

Cabe destacar que la figura 2.5 corresponde aproximadamente al comportamiento que se obtiene en el ensayo de compresión axial de una probeta de madera.



**Figura 2.5:** Diagrama del ensayo de compresión paralela.

**Fuente:** Cuevas, 2003.

### 2.3.5. FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

La madera, es un material heterogéneo, que se ve reflejado por la variabilidad que es posible encontrar en probetas extraídas de una misma especie maderera y de diferentes árboles, o aún más de probetas provenientes de un mismo árbol, lo que muestra una marcada diferencia en su densidad y resistencia. Ésta variabilidad responde a diferencias genéticas, de ambiente y/o ambas. Es por esto que posee valores de resistencia variables. Incluso pueden resultar más variables debido a que algunas de sus características no son controladas o controlables. Entre las más importantes cabe señalar:

- Contenido de humedad.
- Densidad.
- Ángulo de fibras.
- Nudosidad.

-Temperatura.

-Otras influencias.

Contenido de humedad.

El contenido de humedad en la madera afecta en general a propiedades mecánicas tales como, flexión estática, compresión paralela, compresión perpendicular, tracción, cizalle, dureza, clivaje. Sobre el P.S.F, la resistencia mecánica se mantiene constante y a medida que el contenido de humedad disminuye, desde el P.S.F hasta estado anhidro la resistencia mecánica de la madera aumenta (Díaz-Vaz y Cuevas, 1982; Pérez, 1983; Cuevas, 2003), excepto en la propiedad mecánica de tenacidad, ya que disminuye.

Densidad.

La densidad indica la cantidad de sustancia celular presente en una unidad de volumen de madera. Es por esto que especies con madera densa tienen resistencias altas y maderas livianas resisten menos que las anteriores.

Ángulo de fibras.

La dirección de la carga que se aplica, puede coincidir o no con la dirección en que se encuentra el eje mayor de las células. El ángulo que se forma entre la carga aplicada y la fibra, se denomina ángulo de las fibras.

Las mayores resistencias se alcanzan en sollicitaciones paralelas a las fibras, por ser las resistencias mecánicas inversamente proporcionales al ángulo de las fibras.

Nudosidad.

La presencia de nudos en la madera afecta a las propiedades mecánicas por:

- Variación de la dirección de las fibras.

- Diferencias de la densidad entre madera y nudo.

- Presencia de grietas cuando la madera está seca.

Los nudos disminuyen la resistencia de la madera por inducir a una distribución irregular de las tensiones (Díaz-Vaz y Cuevas, 1982).

Temperatura.

El incremento de la temperatura provoca un aumento de la deformación disminuyendo la cohesión en el material.

Las resistencias estáticas disminuyen cuando la temperatura cambia de valores negativos a positivos. Para las resistencias dinámicas los cambios que se producen son irregulares y dependientes de la densidad y el contenido de humedad de la madera ensayada.

Otras influencias.

Cabe destacar que los ataques patógenos de algún modo modifican o destruyen la pared celular, deterioran las resistencias mecánicas, especialmente las resistencias a sollicitaciones dinámicas. Cabe destacar que 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 (Díaz-Vaz y Cuevas, 1982).

#### 2.4. PROPIEDADES VIBRACIONALES

Las propiedades vibracionales como lo son la velocidad de la vibración y fricción interna (capacidad de amortiguamiento), son de principal interés en materiales estructurales.

#### 2.4.1. VELOCIDAD DEL SONIDO

La velocidad del sonido en un material estructural está en función del módulo de elasticidad y de la densidad. En la madera, la velocidad del sonido se ve afectada por la dirección de la fibra porque el módulo de elasticidad transversal es mucho menor que el valor del módulo de elasticidad longitudinal (un poco menor que 1/20); la velocidad del sonido que cruza la fibra es cercano a 1/15 y 1/3 el valor del longitudinal. Por ejemplo, una pieza de madera con un módulo de elasticidad longitudinal de 12.4 GPa, y una densidad de 480 kg/m<sup>3</sup> tendría una velocidad del sonido en la dirección longitudinal cercana a 3800 m/s. En la dirección transversal, el módulo de elasticidad sería cercano a 690 MPa y la velocidad del sonido aproximadamente 890 m/s.

La velocidad del sonido decrece con el incremento de la temperatura o el contenido de humedad en proporción a la influencia que tienen las variables del módulo de la elasticidad y la densidad. La velocidad del sonido decrece ligeramente con el incremento de la frecuencia y amplitud de la vibración, aunque para la mayoría de las aplicaciones este efecto pasa de ser menor a significativo.

Aquí no se reconoce como un efecto independiente de la especie en la velocidad del sonido. La variación de la velocidad del sonido en la madera está directamente relacionada a la variación del módulo de elasticidad y de su densidad.

#### 2.4.2. FRICCIÓN INTERNA

Cuando el material sólido es tenso, algunas energías mecánicas son disipadas en forma de calor. La fricción interna es un término usado en donde los mecanismos causan esta disipación de energía. Los mecanismos de fricción interna en la madera están representados por una compleja función de temperatura y contenido de humedad. En general, el valor del contenido de humedad es de menor relevancia en la fricción interna. En cualquiera de estos mínimos, el incremento de fricción interna decrece cuando el contenido de humedad varía bajo cero o esta sobre el punto de

saturación de fibra. El contenido de humedad el cual es mínimo en la fricción interna ocurre cuando hay variaciones con la temperatura. En una habitación con una temperatura de 23 °C, el mínimo ocurre cercano al 6% del contenido de humedad; para -20 °C, este ocurre cercano al 14% del contenido de humedad, y para 70 °C, cercano a 4%. Para el caso de los 90 °C, el mínimo no está bien definido y ocurren mediciones de contenido de humedad cercanos a 0.

## 2.5. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que indican la capacidad de esta para resistir fuerzas externas, de acuerdo a esta capacidad serán los usos a los cuales la madera es destinada y las secciones transversales necesarias para asegurar una adecuada estabilidad estructural en las construcciones (CORMA, 2003).

Debido a la amplia gama de sollicitaciones a las cuales puede estar expuesta la madera como material estructural, es necesario determinar las propiedades mecánicas de las distintas especies con el fin de caracterizar a cada una de ellas. Para esto, las normas NCh 3028/1 Of.2006 y NCh 3028/2 Of.2008 establecen los métodos para determinar los valores aparentes y admisibles de las siguientes propiedades mecánicas:

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

Una vez determinadas experimentalmente estas propiedades mecánicas es posible caracterizar a la madera en forma confiable para determinar su comportamiento estructural una vez puesta en servicio.

## 2.6. CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA MADERA

### 2.6.1. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LA MADERA

En Chile existe la norma *NCh 1207: Pino radiata – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad*, la cual permite clasificar visualmente la madera aserrada de Pino radiata con fines estructurales.

Como parte de los requisitos de clasificación la norma chilena NCh 1207 señala que las piezas de madera deben cumplir con los requerimientos de tolerancias dimensionales de la NCh 2824 y de contenido de humedad, donde cada pieza debe presentar un contenido de humedad menor o igual al 19% (INN, 2005).

Los grados estructurales resultantes de la clasificación visual que establece la norma chilena son los siguientes (INN, 2005):

- Grado Estructural Selecto (GS): Corresponde a piezas de gran capacidad resistente. Su aplicación usual es el de elementos sometidos a grandes solicitaciones.
- Grado Estructural N°1 (G1): Corresponde a piezas adecuadas para ser utilizadas en tipologías constructivas normales. Adecuado para envigados, pisos y entramados de techumbre
- Grado Estructural N°2 (G2): Corresponde a piezas de moderada capacidad resistente. Adecuado para entramados de muros estructurales.

La figura 2.6 muestra la apariencia de piezas de madera de Pino radiata cepilladas clasificadas en forma visual.



**Figura 2.6:** Apariencia de piezas de Pino radiata clasificadas en los grados estructurales de la NCh 1207.  
**Fuente:** Instituto Forestal.

## 2.6.2. CLASIFICACIÓN POR MÁQUINA

En el mercado nacional también se comercializa madera de pino radiata clasificada mecánicamente en los grados C16 y C24, según las especificaciones de la normativa que regula la madera estructural en la unión europea (González, M., 2013).

Las máquinas de clasificación de tipo mecánico o máquinas de flexión, miden el módulo de elasticidad de las piezas, utilizando diferentes propiedades indicadoras.

La clasificación mecánica se basa en un ensayo no destructivo que permita medir uno o más parámetros de la madera para correlacionarlo con su resistencia. Entre los parámetros más comúnmente utilizados se encuentra el módulo de elasticidad, la densidad, el tamaño de nudos, o una combinación de ellos. La tabla 2.1 expone los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que se pueden obtener al correlacionar algunos parámetros de la madera con su resistencia, siendo el módulo de elasticidad el más destacado y usualmente utilizado por las máquinas de clasificación.

La medición de un módulo de elasticidad aparente de la madera, es posible obtener mediante sistemas de medición basados en un ensayo de flexión bajo una carga de prueba que no deteriore las propiedades mecánicas de la madera, o sistemas basados en ultrasonido o frecuencia acústica. En cuanto a la medición de nudos, los sistemas de medición se basan en el uso de cámaras (blanco y negro, o color), laser óptico o rayos-x; y la densidad es posible medir a través de sistemas de rayos-x y de medición de peso (balanzas) (Denzler, J. 2013).

**Tabla 2.1:** Correlación 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

En el caso europeo, la clasificación por máquina se realiza directamente a una clase resistente señalada en la norma EN 338, donde los valores característicos para las propiedades deben ser mayores o iguales que los asignados a dicha clase resistente, lo cual se evidencia con una batería de ensayos físicos y mecánicos de madera en tamaño comercial según las especificaciones de la norma europea *EN 384: Madera estructural – Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Generalmente este método requiere una inspección visual posterior a la clasificación mecánica para considerar características de reducción de resistencia que no son automáticamente percibidas por la máquina. Finalmente, el sistema europeo considera una lista de máquinas aprobadas que se detallan en el estándar EN 14081-4.

En el mercado australiano los grados MGP (MGP10, MGP12 y MGP15) y en el mercado neozelandés los grados MSG (MSG6, MSG8, MSG10, MSG12 y MSG15) sus valores característicos se determinan mediante ensayos de piezas de tamaño comercial clasificada por su resistencia según el estándar AS/NZS 4063.1, los cuales deben ser mayores o iguales a los valores de diseño tabulados.

En los Estados Unidos y Canadá, la madera MSR y MEL también son objeto de una clasificación visual posterior a la pasada por la máquina, para controlar las características reductoras de resistencia que no son posibles de medir por la máquina clasificadora. Además los valores admisibles de la madera clasificada por su resistencia en los grados MSR o MEL deben ser determinados mediante ensayos de piezas de tamaño comercial según las especificaciones de la norma ASTM D2915, corroborando que dichos valores sean mayores o iguales que los tabulados para el grado respectivo. Finalmente, el Consejo de revisión del ALSC mantiene un listado de máquinas de clasificación aprobadas para su uso en el mercado norteamericano.

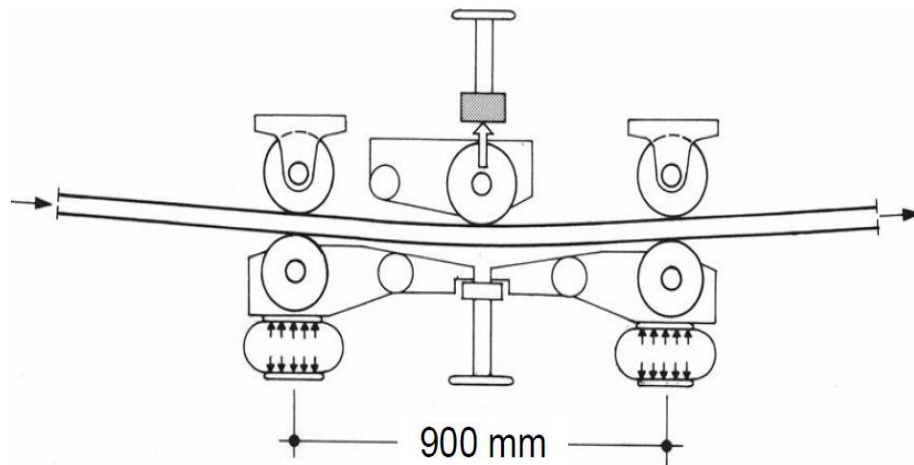
Las máquinas de clasificación más utilizadas en los mercados internacionales se pueden agrupar según el sistema de medición que utilicen, ya sea mediante un ensayo de flexión, vibración acústica, o rayos-x (Tabla 2.2). En los párrafos siguientes se detalla algunas características generales de las máquinas de clasificación señaladas en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Máquinas clasificadoras según sistema de medición (Fuente: Denzler, J. 2013).

<b>Sistema de medición</b>	<b>Nombre comercial máquina clasificadora</b>
Flexión	Computermatic / Micromatic
	Cook Bolinder / Tecmach
	Raute Timgrader
Vibración acústica	Dynagrade
	Viscan
	Timber grader MTG
Rayos-x	Euro-Grecomat 702
	GoldenEye 702
Rayos-x y flexión	Euro-Grecomat 704
Rayos-x y vibración acústica	Euro-Grecomat 706
	GoldenEye 706

#### Máquina Cook Bolinder

Este equipo presenta como principio de funcionamiento la medición de la fuerza que se necesita aplicar para conseguir una deformación determinada. La propiedad indicadora es la fuerza que se aplica entre rodillos separados a 900 mm, y se mide cada 100 mm a lo largo de la pieza de madera (ver figura 2.7). La velocidad de clasificación se encuentra normalmente entre 60 a 100 m/min, y puede clasificar piezas de hasta 76 m de espesor y 300 mm de ancho. La clasificación se obtiene tras dos pasadas consecutivas a través de la máquina, para aplicar una fuerza en cada cara de la pieza (Hermoso, E. 2001).

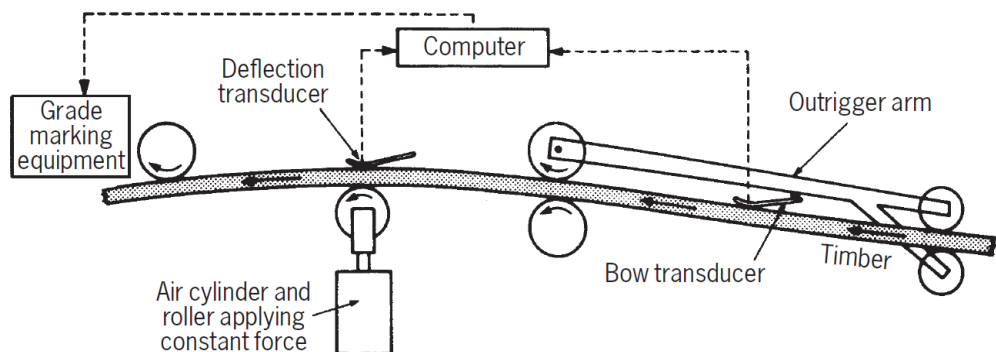


**Figura 2.7:** Esquema de funcionamiento de la máquina Cook Bolinder.

**Fuente:** Dezler, J. 2013

### Máquina Computermatic

Como ya se expuso en el capítulo anterior, este tipo de maquina la propiedad indicadora es la deformación producida al aplicar una fuerza constante sobre la cara de la pieza a clasificar apoyada entre rodillos distanciados a 914 mm, y cuya medición se realiza cada 500 mm a lo largo de la pieza (ver figura 2.8). Al igual que la maquina Cook Bolinder, la velocidad de clasificación puede variar de 60 a 100 m/min, y puede clasificar piezas de hasta 76 mm de espesor y 300 mm de ancho (Fernández-Golfín et al, 2001).

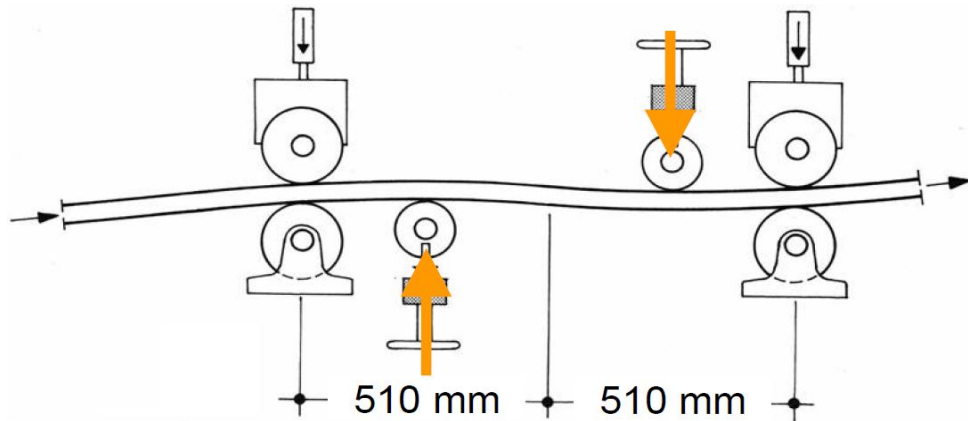


**Figura 2.8:** Esquema de funcionamiento de la máquina Computermatic.

**Fuente:** Dezler, J. 2013.

## Máquina Raute Timgrader

Al igual que la máquina Cook Bolinder, este equipo presenta como principio de funcionamiento la medición de la fuerza que se necesita aplicar para conseguir una deformación determinada. La propiedad indicadora es la fuerza que se aplica entre rodillos separados a 510 mm, midiendo en una pasada ambas caras de la pieza a clasificar, tal como se esquematiza en la figura 2.9 (Fernández-Golfín et al, 2001).



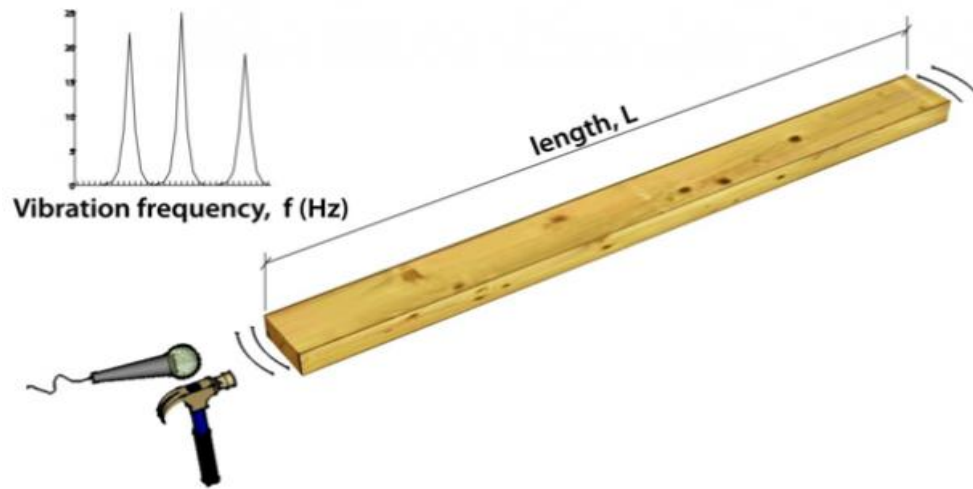
**Figura 2.9:** Esquema de funcionamiento de la máquina Raute Timgrader.  
**Fuente:** Dezler, J. 2013.

## Máquina Dynagrade

Este equipo como principio de funcionamiento es la determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante la medición de la frecuencia de resonancia de una vibración longitudinal producida por un pequeño impacto en uno de los extremos de la pieza, tal como se puede apreciar en la figura 2.10 (Fernández-Golfín et al, 2001). Este mecanismo de impacto, cargado con un resorte en la unidad principal de la máquina, se activa con el movimiento de la madera y es capturado por micrófonos; al mismo tiempo la longitud de la pieza de madera se mide a través de un sistema laser (DYNALYSE, 2013).

Esta máquina, que se observa en la figura 2.11, puede clasificar piezas de espesor entre 19 y 110 mm, anchos entre 60 y 300 mm, y largos de 1.200 a 7.200 mm; y su

velocidad de clasificación puede llegar hasta los 96 m/min (DYNALYSE, 2013).



**Figura 2.10:** Esquema de funcionamiento de la máquina Dynagrade.  
**Fuente:** DYNALYSE, 2013.



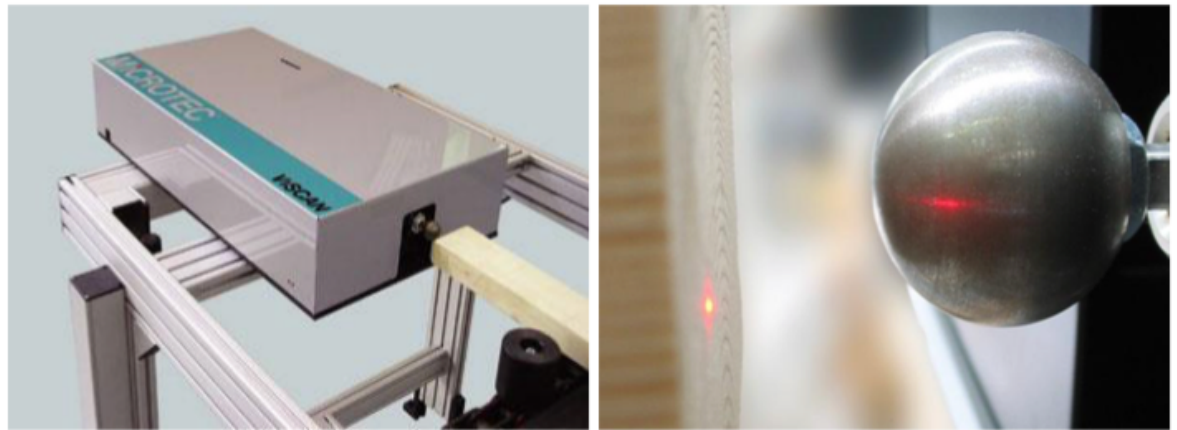
**Figura 2.11:** Máquina Dynagrade.  
**Fuente:** DYNALYSE, 2013.

### Máquina ViSCAN

Este equipo presenta el mismo principio de funcionamiento que la Dynagrade, la medición de la frecuencia de resonancia de una vibración longitudinal a través de la madera, logrando correlacionar esta propiedad indicadora con su módulo de elasticidad. La velocidad de clasificación puede llegar a las 150 piezas/min o 450

m/min (ver figura 2.12). El proveedor de esta máquina ofrece la posibilidad de combinar la medición de la frecuencia de vibración con otras propiedades indicadoras como la densidad de la madera a través de sistema de rayos x, haciendo más precisa la estimación de la rigidez de la madera (MICROTEC, 2013).

Sobre los requerimientos para la clasificación con la ViSCAN, la madera debe presentar una temperatura superior a 0°C, el contenido de humedad debe estar dentro del rango de 8% a 20%, y el acabado superficial puede ser cepillado a aserrado (CEN, 2009).



**Figura 2.12:** Máquina ViSCAN

**Fuente:** MICROTEC, 2013.

#### Máquina Timber Grader MTG

Este equipo, se basa en el principio de funcionamiento de medir la frecuencia de vibración acústica, tal como las máquinas ViSCAN y Dynagrade, sin embargo su gran diferencia es que corresponde a un sistema portable (ver figura 2.13). Sobre los requerimientos para clasificar con este equipo portátil, la madera puede ser cepillada o aserrada, la temperatura de la madera deber ser mayor a 0°C, el contenido de humedad debe estar entre 10% y 25%, además este método de clasificación se debe combinar con los requerimientos visuales que establece el estándar europeo para

clasificación mecánica descritos en la norma EN 14081-1 (CEN, 2009). Finalmente hay que tener en cuenta que el marcado de las piezas con el MTG no es automático, por lo que se necesitan requerimientos extra de control en la producción.

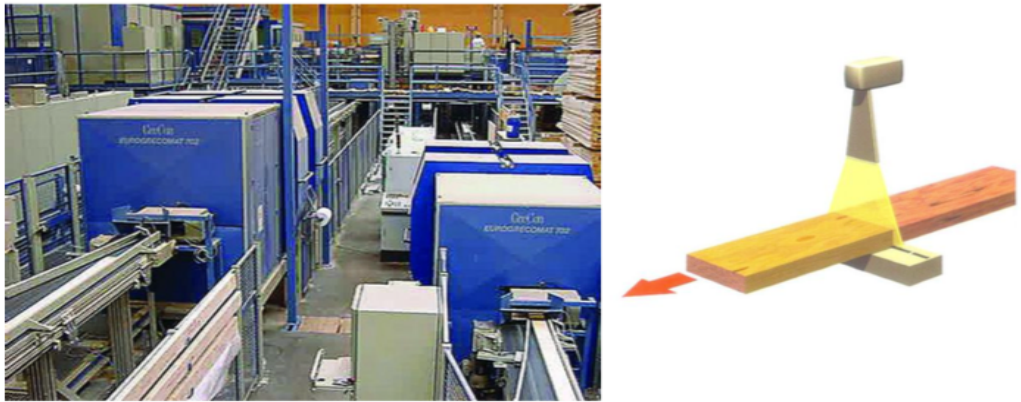


**Figura 2.13:** Máquina de clasificación Timber Grader MTG.

**Fuente:** BROKHUIS, 2013.

#### Máquina Euro-GreComat

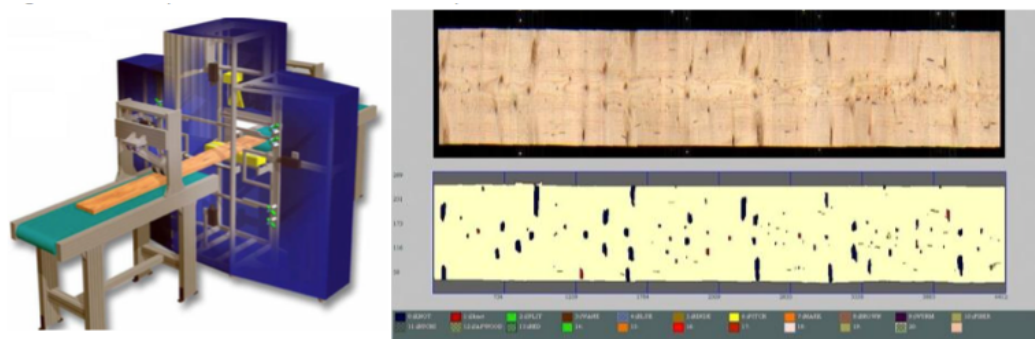
Esta máquina utiliza un escáner de rayos X, y cámaras mediante los cuales estima la densidad de la madera y algunas de sus características de crecimiento, tales como nudos, desviación de fibra (ver figura 2.14). Su velocidad de clasificación puede llegar a 300 m/min, y sus requerimientos para la madera a clasificar son más estrictos: requiere un acabado cepillado, y un contenido de humedad entre 7% y 15% (CEN, 2009).



**Figura 2.14:** Máquina de clasificación Euro-GreComat.  
**Fuente:** Dezler, J. 2013.

### Máquina GoldenEye

Al igual que la Euro-GreComat, esta máquina utiliza un escáner de rayos X, y cámaras mediante los cuales estima la densidad de la madera y algunas de sus características de crecimiento, tales como nudos, desviación de fibra (ver figura 2.15) (MICROTEC, 2013); y sus requerimientos para la madera a clasificar son más estrictos: requiere un acabado cepillado, y un contenido de humedad entre 7% y 15%. La velocidad máxima de clasificación es de 450 m/min y puede clasificar piezas de hasta 110 mm de espesor y 319 mm de ancho (CEN, 2009).



**Figura 2.15:** Máquina de clasificación GoldenEye.  
**Fuente:** MICROTEC, 2013.

## 2.7. ANTECEDENTES GENERALES DEL PINO RADIATA

### 2.7.1. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS

Madera con crecimiento de los anillos anuales bien diferenciados de limitándose por una franja estrecha de madera de verano más oscura.

Anillos de anchura bastante irregular, exageradamente anchos sobre todo en los primeros años, pudiendo alcanzar los 15 cm para con la edad irse haciendo más regulares y estrechos oscilando alrededor de los 2 a 6 cm de anchura.

Posee un grano medio a fino, es esponjosa, ligera a mediano peso, medianamente dura y muy poco resinosa.

### 2.7.2. PRODUCCIÓN Y PLANTACIONES DE PINO RADIATA A NIVEL NACIONAL

Desde sus inicios la silvicultura de las plantaciones de pino ha evolucionado desde la nula o escasa intervención del manejo, hasta la fuerte aplicación de prácticas intensivas.

En la década del 30, se dicta en Chile la Ley de Bosques de 1932, cuyo principal objetivo era incrementar la oferta de madera en el país. En esa época, la madera se destinaba a producción de pulpa y madera aserrable con nudos. Bajo esta ley, Chile logró formar una masa forestal de *Pinus radiata* de 300.000 ha en 1964, y de 400.000 ha en el año 1972.

En la actualidad se tiene un registro de las plantaciones para las distintas especies a nivel nacional, las que se observan en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Inventario de plantaciones forestales por especies, 2014.

Especie	Hectáreas	%
Pinus Radiata	1434085	59,1
Eucalyptus globulus	574602	23,6
Eucalyptus nitens	255126	10,5

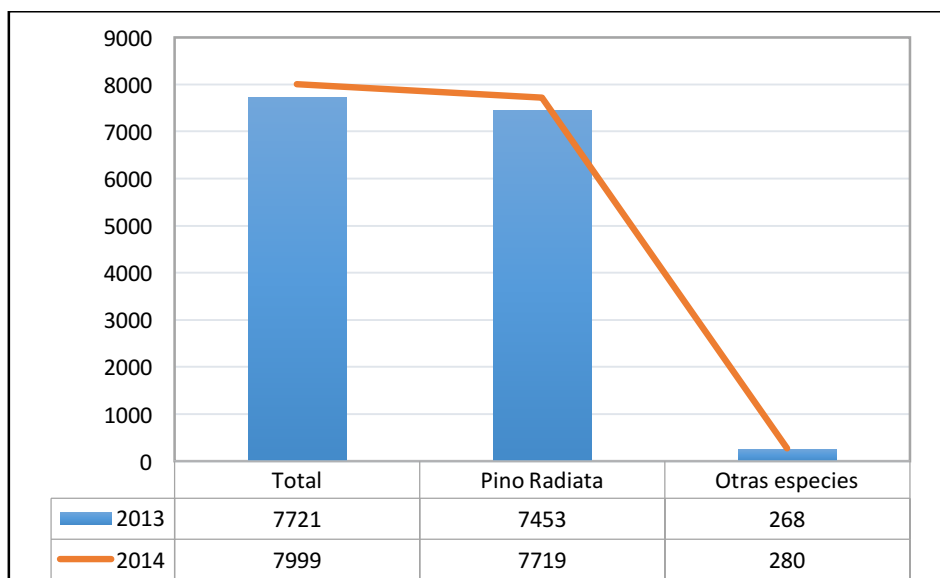
Atriplex sp.	60772	2,5
Pinus Ponderosa	25287	1,0
Pseudotsuga menziesii	17148	0,7
Otras especies	60703	2,6
<b>Total</b>	<b>2426722</b>	<b>100,0</b>

En la región del Biobío en el año 2014 se registraron 926530 ha de plantaciones forestales, siendo a nivel nacional la de mayor importancia, seguida por la región de La Araucanía con 483482 ha.

Junto con el aumento creciente de la masa de bosques plantados, se produce un notable incremento en la cantidad de productos factibles de obtener (pulpa, celulosa, papeles, cartones, tableros de fibras y partículas, madera aserrada libre de nudos, tableros contrachapados y madera elaborada) (Leyton, 1986, cit. Gerding, 1991), bajo este contexto, la industria forestal chilena se orienta a la producción de materia prima con la calidad necesaria para alcanzar el mercado de madera libre de nudos y de madera pulpable, orientado al consumo nacional e internacional.

Actualmente, para la especie *Pinus radiata*, destacan principalmente 2 tipos de manejo, el primero de ellos destinado a obtener madera libre de nudos, y el segundo orientado a la obtención de madera pulpable (AD403S00).

A nivel nacional la producción industrial de pino radiata ha tenido un aumento de esta misma entre los años 2013 y 2014, lo que se observa en la figura 2.16, de la que además se puede extraer que el 96.5% corresponde a pino radiata de la producción industrial total, siendo el 3.5% producción de otras especies a nivel nacional (INFOR, 2015).



**Figura 2.16:** Madera aserrada (x1000 m<sup>3</sup>) durante los años 2013 y 2014.  
**Fuente:** INFOR, 2015.

### 2.7.3. USOS

Es una especie de gran interés para la industria por la calidad de su madera y su rápido crecimiento, que hace que su cultivo comience a dar beneficios en pocos años.

Su madera se aprovecha para diferentes fines, entre los que destacan la pasta de papel, la fabricación de tableros de partículas, tableros y aglomerados, muebles, envases, embalajes, entre otros.

### 2.7.4. DISTRIBUCIÓN

El Pino Radiata crece en una gran diversidad de ambientes. Puede vivir con precipitaciones relativamente bajas, pero crece indiferente a las condiciones del suelo, ya que en Chile ha ocupado terrenos improductivos abandonados por la agricultura y en los cuales la recuperación de la vegetación nativa es difícil.

En la práctica, ha demostrado poseer buenas aptitudes de crecimiento y desarrollo en cualquier lugar del país, excepto en los sitios muy secos (desiertos del Norte), en la Cordillera de Los Andes, en suelos pantanosos y en lugares con abundantes nevadas y temperaturas más allá de los 7°C bajo cero.

Los crecimientos óptimos para el Pino Insigne se encuentran entre Constitución y Valdivia, en las colinas de la Cordillera de la Costa, con temperaturas mínimas no inferiores a los 5°C bajo cero y precipitación anual media entre mil y dos mil milímetros. Allí puede crecer a ritmos anuales superiores a 25 metros cúbicos por hectárea.

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y EQUIPOS DE TRABAJO

### 3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS, MATERIALES Y USO

#### 3.1.1. PROBETAS DE PINO RADIATA

Las probetas de Pino Radiata (*Pinus Radiata*) utilizadas en el presente estudio se obtuvieron de cuatro provincias de la región del Biobío, Concepción, Biobío, Arauco y Ñuble, con un total de 1826 probetas a ensayar, en la tabla 3.1 se muestran la cantidad de probetas por provincias y en la figura 3.1 se observan algunas de las probetas ensayadas.

**Tabla 3.1:** Cantidad de probetas por cada provincia de la región del Biobío.

Provincia	Concepción	Biobío	Arauco	Ñuble
N. Probetas	76	773	454	523



**Figura 3.1:** Probetas de Pino Radiata a ensayar.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.2. XILOHIGRÓMETRO PORTÁTIL

El xilohigrómetro portátil es un instrumento que sirve para medir el contenido de humedad de las especies madereras con tan solo un contacto directo entre el instrumento y la probeta en estudio.

Su funcionamiento se basa en las propiedades dieléctricas de la madera, ya que su capacidad de transmitir la electricidad se ve alterada por la humedad existente en el material. La constante dieléctrica se encuentra en forma proporcional entre el aire y la cantidad de materia, por lo que ésta se encuentra en función de la densidad del material (Mena, M., 2009). Así, el único dato de entrada que requiere el xilohigrómetro portátil es la densidad básica de la especie en estudio. El instrumento aplica una tensión de alta frecuencia (RF de 1 a 10 MHz) y la cantidad de energía absorbida depende del contenido de humedad de la madera la que es convertida a lecturas de contenido de humedad (Mena, M., 2009).

En la figura 3.2 se muestra el instrumento utilizado en las mediciones de contenido de humedad del material ensayado.



**Figura 3.2:** Xilohigrómetro portátil.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.3. PIE DE METRO

El pie de metro es utilizado para medir objetos relativamente pequeños y cuenta con una sensibilidad de 0,01 mm. Para el presente estudio el pie de metro se utilizó para realizar las mediciones de ancho y alto de las probetas a ensayar.

Su funcionamiento es bastante rápido ya que al contar con un sistema digital, la lectura es de fácil obtención.

En la figura 3.3 se presenta el pie de metro digital utilizado en este estudio.



**Figura 3.3:** Pie de metro.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.4. CINTA MÉTRICA

La cinta métrica es un instrumento utilizado para medir objetos por lo general de una magnitud considerable o que no requieran de una gran sensibilidad. La cinta cuenta con una sensibilidad de 0,001 m y para este caso en particular, se utilizó una cinta de un largo máximo de 5 m, ya que su uso se limitó para medir la longitud total de cada una de las probetas a ensayar, las cuales eran todas menores a 5 m de longitud.



**Figura 3.4:** Cinta métrica utilizada.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.5. TIMBER GRADER MTG

El Timber Grader es un instrumento que calcula rigidez y resistencia de una pieza de madera y los visualiza con modelos aritméticos diseñados especialmente para maderas.

El “Activador de ondas de tensión” y el “Detector de ondas de tensión” están incorporados en el dispositivo portátil de medición MTG. Para operaciones comunes, el MTG dispone de una serie de teclas de ajuste, un botón de confirmación de inicio y una pantalla LCD con iluminación de fondo.

El “Activador de ondas de tensión” envía un impulso a través de la pieza de madera en dirección longitudinal. El impulso se refleja y se devuelve hacia el final de la pieza. El Detector de onda de tensión recibe este impulso y lo envía al PC mediante conexión Bluetooth como un paquete de datos.

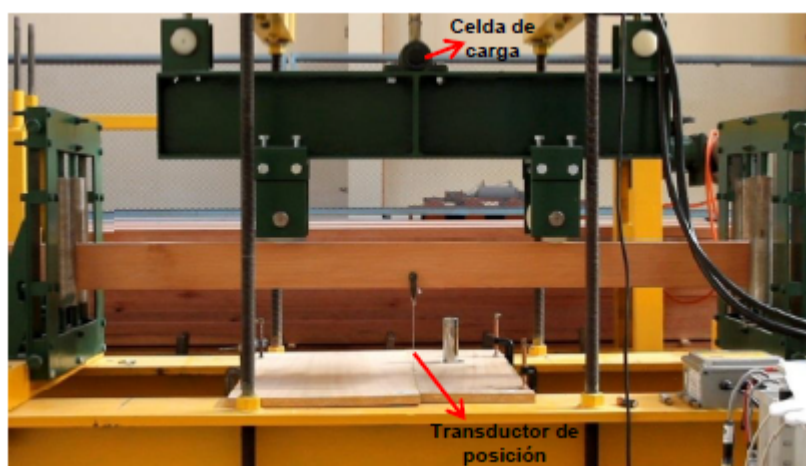
En el MTG se incluye una batería, la cual, en circunstancias normales tendrá una duración mínima de 8 horas.



**Figura 3.5:** Timber Grader MTG.  
**Fuente:** Brookhuis, 2012.

### 3.1.6. MARCO DE REACCIÓN

El marco de reacción utilizado para los ensayos de flexión estática, es el equipo que se presenta en la figura 3.6. Está dotado de un gato hidráulico, una celda de carga, un transductor de posición (Ver figura 3.7) y un software propio.



**Figura 3.6:** Marco de reacción.  
**Fuente:** Padilla, J., 2014.



**Figura 3.7:** Transductor de posición y pantalla de resultados del marco de reacción.

**Fuente:** Padilla, J., 2014.

Su funcionamiento consiste básicamente en aplicar carga en los tercios de una probeta de madera y medir, con el transductor de posición, la deflexión que se produce en el punto medio de la viga al momento de la rotura del material. Los datos de carga aplicada y deflexión medida son guardados en el software propio del marco de reacción (Data acquisition system laboratory, DASYLAB) y también graficados in situ (Ver figura 3.7).

Este equipo es utilizado para obtener los datos necesarios de fuerza aplicada y deflexión producida con los cuales se puede obtener el módulo de elasticidad estático y tensión de rotura en flexión.

### 3.1.7. CRÓNOMETRO

El cronómetro es un instrumento para medir intervalos de tiempo según se requiera. Para esta investigación se utilizó simplemente el cronómetro que viene incorporado en los dispositivos celulares, ya que la precisión que se requirió fue bastante baja.

Su uso se limitó solo a medir cuanto tiempo se demoró cada ensayo, desde que la probeta comienza a ensayarse hasta el momento en que se llega a la rotura del material.

Este dato se mide sólo por requerimiento de la NCh 3028/1 Of.2006.



**Figura 3.8:** Cronómetro utilizado.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.8. BALANZA

La balanza Radwag WTB 2000 es un instrumento que mide masa con una sensibilidad de 0,01 g, midiendo como máximo 2000 g. Se utilizó en este estudio para determinar las masas de las probetas que se utilizaron para calcular la densidad real del Pinus Radiata ensayado.



**Figura 3.9:** Balanza Radwag WTB 200 utilizada.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 3.1.9. HORNO

Los hornos de secado son equipos que climatizan ambientes cerrados a altas temperaturas y son programables tanto por tiempo como por temperatura. Dentro del ambiente del horno se instalan las piezas de madera, los cuales pierden humedad hasta el estado anhidro.

El horno utilizado fue el Yih Der DK-600DT para reducir el contenido de humedad de las probetas que se utilizaron en los ensayos y así poder determinar la densidad real del Pino Radiata ensayado.



**Figura 3.10:** Horno Yih Der DK-600DT utilizado.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.

### 4.1. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE MUESTRAS POR CADA PROVINCIA

Las muestras de madera a ensayar se pueden obtener desde los apilados en aserraderos, centros de distribución, en puntos de uso final o directamente desde la producción normal de un aserradero.

Sobre el tamaño de la muestra, la NCh 3028/2 determina que dependerá de la propiedad o propiedades que se deban estimar, la variación efectiva de las propiedades presentes en la población y la precisión con la que se debe estimar la propiedad. Para cada grado estructural se debe estimar el valor promedio del módulo de elasticidad y de la compresión paralela a la fibra, mientras que para las tensiones admisibles de resistencia a flexión, tracción paralela a las fibras, compresión paralela a las fibras y cizalle, se debe estimar un valor mínimo probable.

El tamaño muestral suficiente para estimar el valor promedio de una propiedad se obtiene a partir de la siguiente fórmula (INN, 2008):

$$n = \left( \frac{ts}{0,05\bar{X}} \right)^2 = \left( \frac{t}{0,05} CV \right)^2$$

Donde,

- n : Tamaño de la muestra.
- s : Desviación estándar de los resultados experimentales.
- $\bar{X}$  : Valor promedio de los resultados experimentales.
- CV : Coeficiente de variación.
- 0,05 : Precisión del valor estimado.
- t : Valor estadístico t de Student.

Esta fórmula asume que los valores se distribuyen normalmente y que el valor promedio se estima dentro del 5% de la confianza especificada. El valor promedio y la desviación estándar a menudo no se conocen antes de comenzar el programa de ensayo, sin embargo, se pueden aproximar al utilizar valores de otros programas de ensayo o simplemente se pueden estimar.

Para determinar el tamaño de muestra de las propiedades mínimas probables se puede utilizar los valores de la tabla 4.1, según el estadístico de orden que se desee para la estimación del límite de exclusión del 5% (INN, 2008)

**Tabla 4.1:** Tamaño de muestra de las propiedades mínimas probables según estadístico de orden.

Nivel de confianza del 75%		Nivel de confianza del 95%		Nivel de confianza del 99%	
Tamaño de la muestra	Estadístico de orden	Tamaño de la muestra	Estadístico de orden	Tamaño de la muestra	Estadístico de orden
28	1	59	1	90	1
53	2	93	2	130	2
78	3	124	3	165	3
102	4	153	4	198	4
125	5	181	5	229	5
148	6	208	6	259	6
170	7	234	7	288	7
193	8	260	8	316	8
215	9	286	9	344	9
237	10	311	10	371	10
259	11	336	11	398	11
281	12	361	12	425	12
303	13	386	13	451	13
325	14	410	14	478	14
347	15	434	15	504	15
455	20	554	20	631	20
562	25	671	25	755	25
668	30	786	30	877	30
879	40	1013	40	1115	40
1089	50	1237	50	1349	50

Fuente: INN, 2008.

Una vez realizados los cálculos descritos anteriormente se obtiene la cantidad de probetas a ensayar (ver tabla 4.2) para estimar las propiedades de resistencia a flexión, compresión, cizalle y tracción.

**Tabla 4.2:** Cantidad de probetas a ensayar.

Ensayo	Flexión Paralela	Compresión Paralela	Cizalle Paralelo	Tracción Paralela	Total
N° Elem.	446	467	466	447	1826

#### 4.2. IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS

Cada probeta, luego de que se clasificó estructuralmente de manera visual y antes de cualquier manipulación posterior, fue identificada y marcada con un plumón permanente en ambos extremos de una cara (Ver figura 4.1). La información que identifica a la probeta se asigna según el instructivo de trabajo interno del LME-INFOR correspondiente. Esta identificación adquiere la forma S.XXX - AA.XX - P.XXX, donde queda expresado el número de solicitud de ensayo (S.XXX), el código de ensayo (AA.XX) y el número de probeta (P.XXX), asignado en orden correlativo, según la clasificación estructural visual correspondiente. Esto se realiza con la finalidad de establecer un registro de cada espécimen.

Para esta investigación, la identificación de las probetas a ensayar por flexión quedó como S.022-FE-XX-P.XXX, compresión paralela S.022-CP-XX-P.XXX, tracción paralela S.022-TP-XX-P.XXX y para el caso de cizalle S.022-CZ-XX-P.XXX.



**Figura 4.1:** Identificación de probetas.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 4.3. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA MADERA

Las mediciones de las propiedades geométricas de la madera se especifican en el apartado 5 de la norma NCh 3028/1 Of.2006 “Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificadas por su resistencia – Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural”.

En dicho apartado se menciona que las dimensiones de ancho y espesor de las probetas a ensayar se deben medir con una precisión del 1%, por lo que se procedió a realizar esta medición con un pie de metro (Ver figura 4.2). También la NCh 3028/1 Of.2006 establece que estas mediciones se deben realizar en tres puntos de la sección transversal de cada probeta, es decir, en ambos extremos y en la parte central de la probeta, considerando que las mediciones no se deben tomar a menos de 150 mm de los extremos.

Si estas dimensiones varían dentro de la misma probeta, es decir, las tres mediciones son distintas dentro del rango del 0,01 mm, la dimensión por espécimen que se considera como ancho y espesor respectivamente se debe estimar como la media de las tres mediciones efectuadas.

Con respecto a la medición del largo de las probetas, la norma no menciona precisión ni metodología, por lo que esta medición se realizó con una cinta métrica de sensibilidad 1 mm, lo cual corresponde a una precisión del 0,1% del largo de la probeta, siendo tomada la medición una vez por probeta de ensayo (Ver figura 4.2).



**Figura 4.2:** Medición de propiedades geométricas de la madera.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 4.4. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

La medición de las propiedades físicas de la madera se divide en dos grupos. El primero son las que se miden antes de la realización del ensayo de flexión estática, mientras que el segundo son las que se miden después.

Las propiedades que pertenecen al primer grupo son la temperatura superficial de las probetas y el contenido de humedad si se realiza por el método del xilohigrómetro, mientras que el segundo grupo lo conforman el contenido de humedad si se realiza por el método del secado por estufa y la medición de la densidad de la madera ensayada.

A continuación se especifica la metodología de medición y determinación de cada una de las propiedades físicas antes mencionadas.

#### 4.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

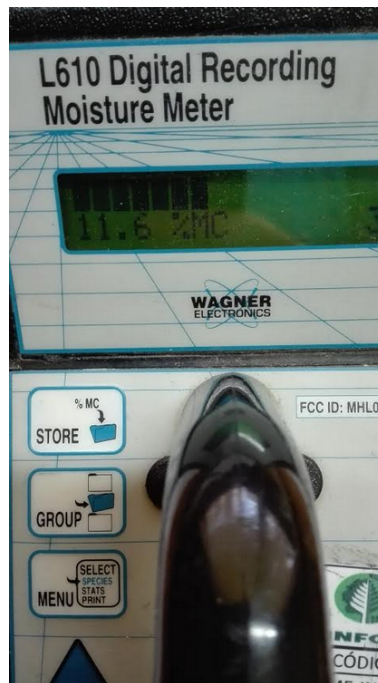
El contenido de humedad de cada probeta en estudio se midió según lo indica la NCh 176/1 Of.1984 “Madera - Parte 1: Determinación de humedad”, la cual establece métodos para determinar el contenido de humedad de la madera: método de secado en estufa y método del xilohigrómetro. En esta investigación se determinó el contenido de humedad por ambos métodos.

##### 4.4.1.1. MÉTODO DEL XILOHIGRÓMETRO

El método que se utilizó fue el método del xilohigrómetro. El cual es aplicable a maderas con un contenido de humedad entre 7% y 28% y no requiere cortar probetas, por lo cual se realiza antes de llevar a cabo el ensayo de flexión estática. El método del xilohigrómetro se realiza utilizando un xilohigrómetro portátil. El que se utilizó es el que se especifica en la sección 3.1.2 del capítulo 3. “Materiales y equipos de trabajo”, y su uso se hace como se indica en el apartado 6.2 de la norma chilena NCh 2827 Of.2008 “Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles”, el cual establece que este equipo mide al contacto y que la medición que se debe registrar es aquella que marca el equipo una vez que se estabiliza su lectura en la pantalla.

Además la NCh 176/1 Of.1984 indica que las mediciones del contenido de humedad por este método se deben realizar en tres puntos a lo largo de cada probeta, es decir, en ambos extremos y en la parte central de esta, considerando que las mediciones no se deben tomar a menos de 150 mm de los extremos (ver figura 4.3)

Si el contenido de humedad varía dentro de la misma probeta en un 0,1%, es decir, las tres mediciones son distintas por sobre el 0,1%, el contenido de humedad por espécimen que se considera es la media de las tres mediciones efectuadas.



**Figura 4.3:** Medición del contenido de humedad con el xilohigrómetro portátil.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 4.4.1.2. MÉTODO DEL SECADO EN ESTUFA

La metodología para determinar el contenido de humedad mediante el secado al horno o en estufa se realizó según lo que establece la NCh 176/1 Of.1984. Aquí se señala que este método se basa en determinar mediante pesadas la pérdida de masa de la probeta cuando esta se seca hasta el punto en que su masa es constante, luego se calcula la pérdida de masa en porcentaje de la probeta seca, lo cual corresponde al contenido de humedad.

Por lo tanto, lo primero que se debe hacer es ensayar la probeta y posteriormente extraer un testigo de esta. Las características que debe tener este se especifican en la sección 4.4.2 de este capítulo.

El testigo debe ser pesado en una balanza con una exactitud de 0,5%, registrar la masa antes del secado como  $m_1$  en un formulario como el que se utilizó y que se presenta en el anexo A1.1. Luego poner a secar el testigo en el horno a una temperatura

de 103°C + 2°C durante 24 horas. Cumplido el tiempo, enfriar la probeta hasta temperatura ambiente y pesar rápidamente para evitar variaciones mayores a 0,1% en el contenido de humedad (Ver figura 4.4). La precisión de la pesada debe ser de 0,1 g. Registrar este dato de masa como masa después de secado m2 en un formulario como el que se utilizó y que se presenta en el anexo A1.1. Después, volver a poner los testigos en el horno durante 2 horas más y repetir el procedimiento anterior. Registrar la tercera medición de masa como m3.

Si la diferencia entre m3 y m2 es igual o menor a 0,5% de la masa de la probeta, se considera que ya se ha logrado el punto de masa constante. En caso contrario repetir el procedimiento anterior hasta llegar al punto de masa constante.



**Figura 4.4:** Método del secado en estufa.  
**Fuente:** Padilla, J., 2014.

Finalmente, para calcular el contenido de humedad, H, expresado en porcentaje con una aproximación de 0,1% se realiza con la siguiente ecuación:

$$H = \left( \frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) 100\%$$

#### 4.4.2. DENSIDAD

Una vez que la probeta es ensayada, según lo indicado en el apartado 7.1 de la NCh 3028/1 Of.2006, la densidad de ensayo de la probeta se debe obtener lo más próxima a la zona de falla, por lo que se corta un testigo de la probeta lo más cerca de la zona de falla, donde este debe ser de un largo no menor que el ancho real de la pieza (Ver figura 4.5).



**Figura 4.5:** Testigo extraído de la probeta.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

Además, a este testigo se le debe medir la masa en gramos, el largo L en mm, y considerar el ancho y espesor medido anteriormente para obtener finalmente la densidad de ensayo mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_e = \left( \frac{m * 10^6}{Ldb} \right) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

La densidad al 12% de humedad en masa  $\rho_{12\%}$ , se debe calcular con la siguiente ecuación:

$$\rho_{12\%} = \rho_e \left( \frac{1,12}{1 + H} \right) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Donde H es el contenido de humedad en el momento del ensayo, determinado por el método de secado al horno, expresado en tanto por uno. Alternativamente, se puede determinar el contenido de humedad con suficiente exactitud utilizando un xilohigrómetro portátil.

#### 4.5. MEDICIÓN DEL MÉTODO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Para la medición del módulo de elasticidad dinámico se utilizó el equipo Timber Grader MTG de Brookhuis, descrito en la sección 3.1.5 del capítulo 3 de este estudio.

El uso del Timber Grader MTG cuenta con una metodología dispuesta por Brookhuis, en la cual se explica detalladamente su utilización, la cual se muestra en la sección 4.5.1 de este capítulo.

##### 4.5.1. USO DEL TIMBER GRADER MTG

En lo que respecta a uso del MTG se puede diferenciar en dos etapas, la primera es lo que corresponde al uso del software propio del equipo y la segunda lo que compete al equipo como tal.

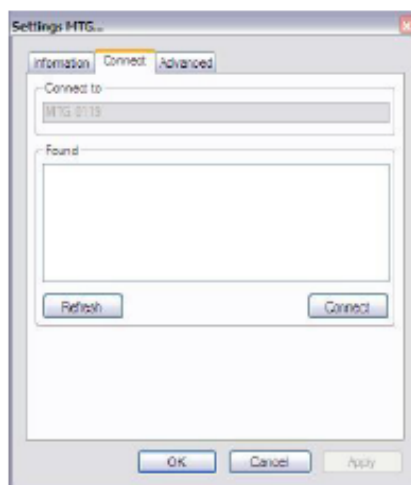
Una vez instalado el software en un computador, se procede a encender el MTG pulsando los botones de cursor izquierda y derecha al mismo tiempo (ver figura 4.6). Si se sueltan los botones, el MTG se encenderá y la pantalla se iluminará. Tan pronto como se inicia el software del MTG, éste buscará automáticamente la conexión con el software Timber Grader a través de la conexión Bluetooth. Tan pronto exista una

conexión, se escuchará un “bip” (una vez). En la pantalla del MTG se mostrará lo siguiente.



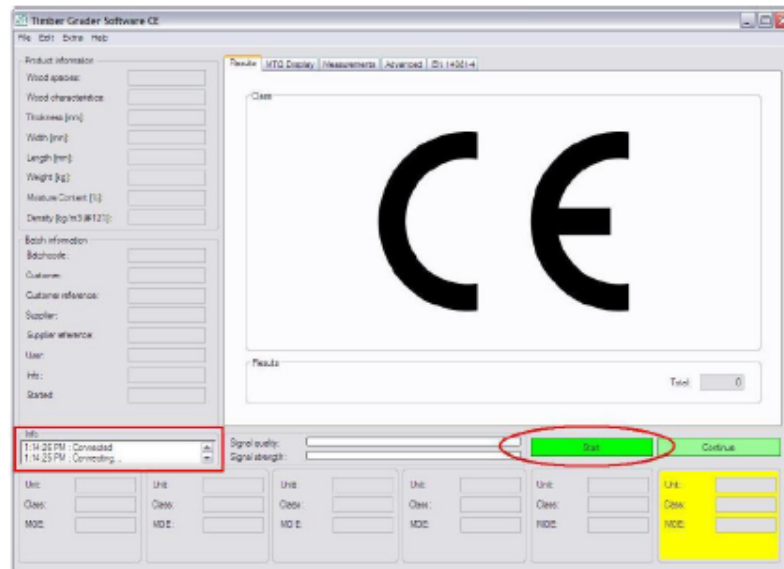
**Figura 4.6:** Encendido Timber Grader MTG.  
**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

El siguiente paso es conectar el MTG con el software previamente instalado en el pc, esto se hace iniciando el software y seleccionando la opción “Settings MTG” en el menú “Extra” (ver figura 4.7), y posteriormente seleccionando la pestaña “Connect”. Seleccionar “Refresh” y esperar hasta que el MTG se conecte. A continuación, pulsar “Connect” para establecer conexión mediante Bluetooth. Finalmente pulsar OK.



**Figura 4.7:** Conexión mediante Bluetooth de MTG con software.  
**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

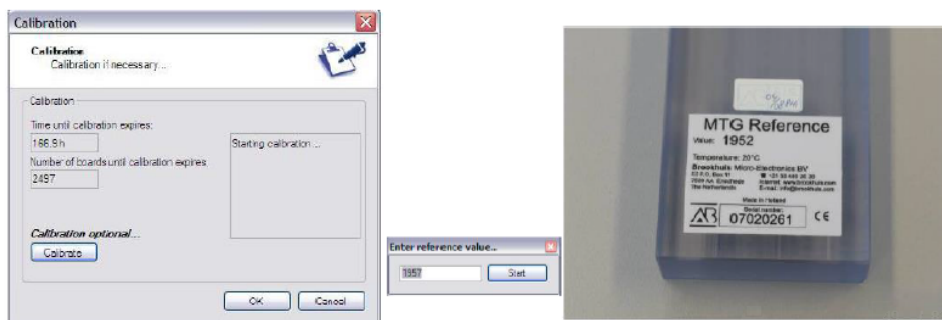
Si la conexión se establece, el punto de tiempo de la conexión se efectúa con la notificación "Connected". Entonces también el botón "Start" parpadeará mostrando que el Timber Grader MTG está listo para su uso (ver figura 4.8).



**Figura 4.8:** Conexión exitosa del MTG y software.

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

Una vez se establezca una conexión entre el MTG y el software es necesario calibrar el equipo para esto es necesario ir al menú "Extra", seleccionar "Calibration", luego pulsar "Calibrate" e introducir el valor de referencia el cual se encuentra en la barra de calibración de la cual dispone el equipo (ver figura 4.10), en este caso ese valor es 1952.



**Figura 4.9:** Calibración MTG.

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

Ya calibrado el equipo se procede a realizar las mediciones respectivas, para esto es necesario crear un nuevo lote "Edit new Batch". Un lote se compone de toda la información pertinente sobre el lote y cómo se llevaron a cabo las mediciones. Tan pronto como toda la información se ha registrado, el botón "OK" permite continuar con el procedimiento y "Cancel" permite detener el mismo (ver figura 4.10).

BatchNo:	MTG0119000011		
Customer:	HMC Rotterdam	Customer ref.:	24 november 2009
Supplier:	Groothandel	Supplier ref.:	Test
User:	Manella	Info:	BNE
Setting:	CE14001		

**Figura 4.10:** Edición do nuevo lote.

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

En este cuadro es necesario modificar cliente (Customer), en el que se coloca el nombre de la compañía o cliente, en Info 1 se puede agregar el contacto del cliente y en Info 2 información adicional que pertenezca o describa al cliente (ver figura 4.11).

CustomerName	Info1	Info2
Liggenst Houtbouw		
HMC Rotterdam		
Overn	Fery	Belangrijke klant, productie voorn...

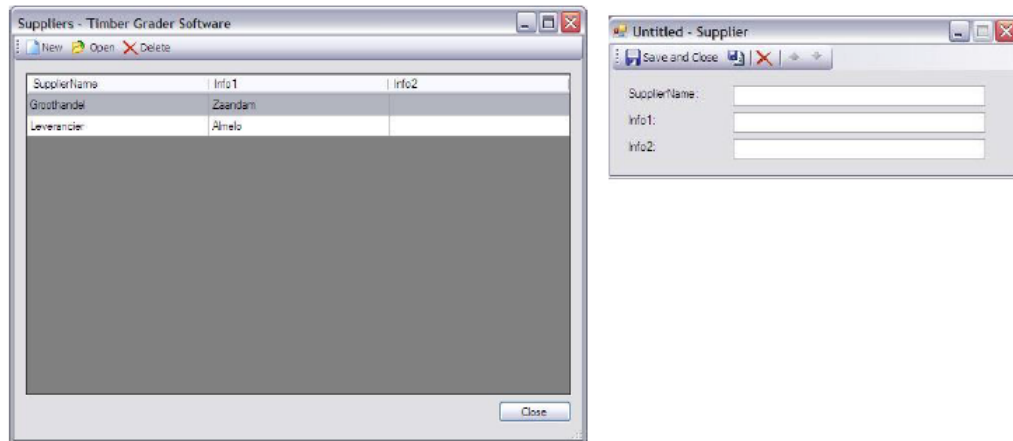
  

CustomerName:	
Info1:	
Info2:	

**Figura 4.11:** Edición de nuevo cliente (Customer).

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

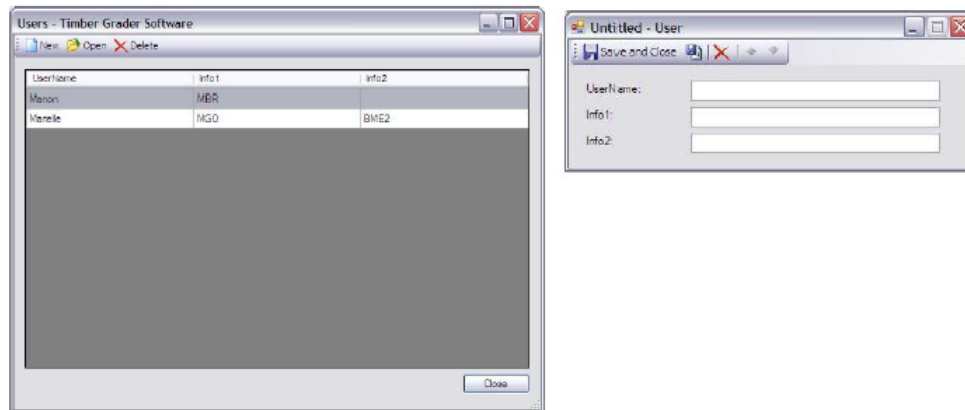
Después de haber creado el cliente se debe crear un nuevo proveedor (Supplier), en donde también se debe crear un nombre de proveedor, en Info 1 se puede agregar el contacto del proveedor y en Info 2 información adicional que pertenezca o describa al proveedor (ver figura 4.12).



**Figura 4.12:** Edición Proveedor (Supplier).

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

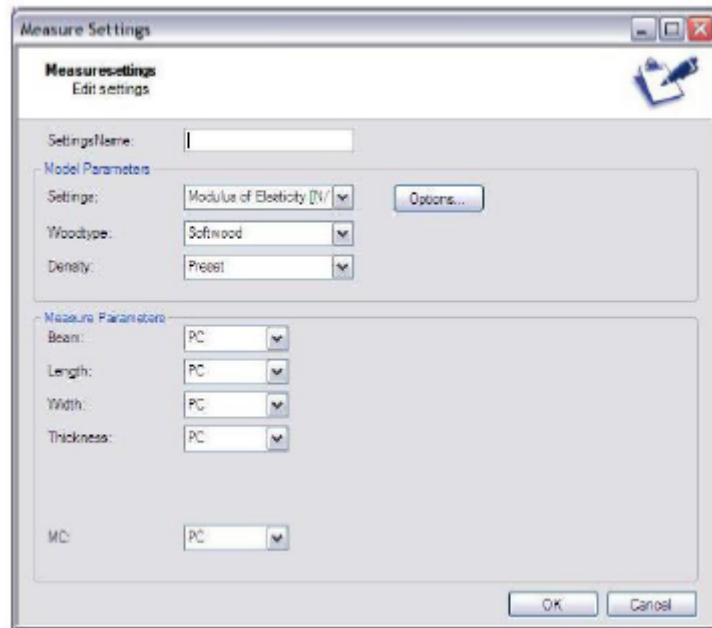
Lo mismo se hace para la creación de un nuevo usuario (user), donde se debe crear un respectivo nombre y sus características (ver figura 4.13).



**Figura 4.13:** Edición de usuario (user).

**Fuente:** Manual Brookhuis, 2013.

Finalmente es necesario crear un nuevo ajuste de medición (Measure Settings), donde es necesario modificar respecto a la información que necesitemos, para esta investigación se utilizó la información que se aprecia en la figura 4.14.



**Figura 4.14:** Configuración establecida para esta investigación.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

Una vez realizados los procedimientos antes explicados, se procede a realizar el ensayo con el Timber Grader MTG, para obtener el módulo de elasticidad dinámico asociado a cada probeta, para su posterior procesamiento en conjunto con los ensayos mecánicos.

#### 4.6. ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS

Se realizaron ensayos mecánicos a madera de pino radiata cepillada bajo diferentes disposiciones de carga. Además se determinó la densidad y contenido de humedad de cada muestra de madera ensayada.

Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LIME-INFOR), bajo las especificaciones de la norma chilena NCh 3028/1: “*Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia – Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural*”. La determinación de la humedad se realizó mediante xilohigrómetros portátiles calibrados bajo la norma chilena NCh2827.

#### 4.6.1. RESISTENCIA Y RIGIDEZ EN FLEXIÓN

El esquema de ensayo de resistencia y rigidez en flexión se muestra en la figura 4.15. A una pieza de madera de luz 18 d se debe aplicar una carga en dos puntos a igual distancia entre los apoyos de los extremos, con cada carga igual a  $F/2$ . Se debe elegir al azar un canto de la probeta como canto flexo-traccionado. En la figura 4.16 se observa la aplicación de un ensayo para medir la resistencia y rigidez en flexión, donde se puede apreciar la utilización de restricciones laterales para impedir el volcamiento de la pieza, apoyos móviles y un cilindro hidráulico para la aplicación de la carga.

El ensayo consiste en medir la carga aplicada en los tercios de la luz, junto con medir el desplazamiento del eje neutro de la probeta en el centro de la luz. De este ensayo se determina el módulo de elasticidad (E) y la tensión de rotura en flexión ( $f_m$ ), los cuales se calculan con la siguiente ecuación:

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

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

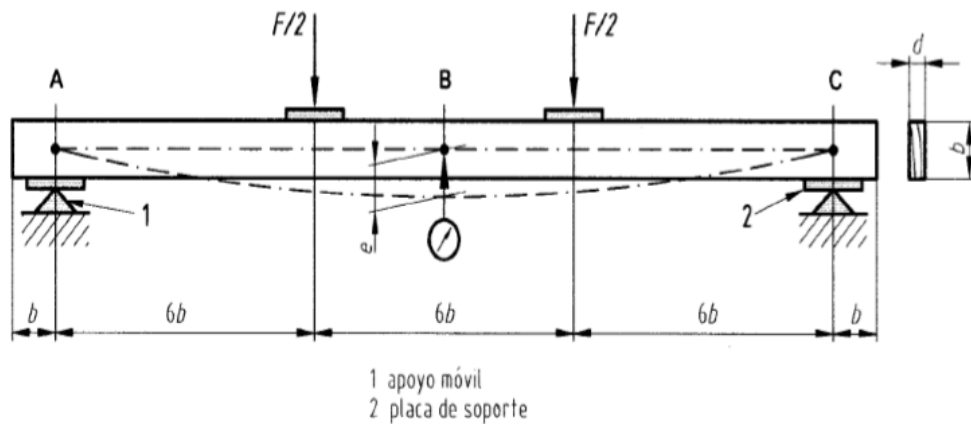
$\left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right)$  : Pendiente de la recta, prolongada del rango elástico de la curva carga-desplazamiento, que se forma de los datos tomados entre el 10% y 40% de la carga máxima.

$$f_m = \frac{F_{\text{máx}}L}{bd^2}$$

Donde,

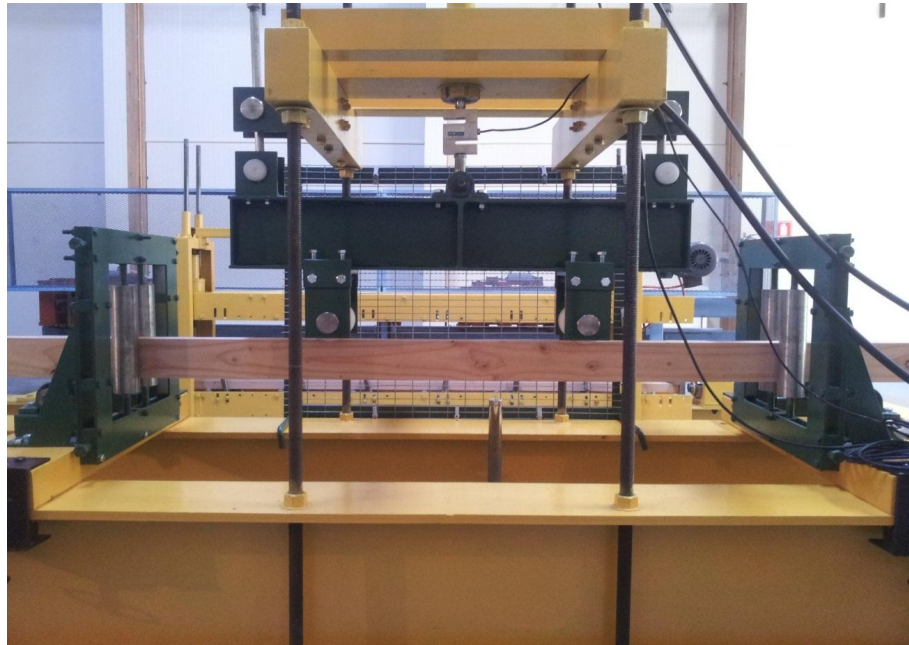
$f_m$  : Resistencia en flexión

$F_{\text{máx}}$  : Valor de la carga aplicada en falla o carga máxima



**Figura 4.15:** Esquema de ensayo de resistencia y rigidez en flexión.

**Fuente:** NCh 3028/1.



**Figura 4.16:** Aplicación del ensayo de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/1.

**Fuente:** Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal LIME-INFOR

#### 4.6.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

El esquema de carga aplicada en el ensayo de tracción paralela a las fibras se ilustra en la figura 4.17. La longitud (L) de la pieza de madera entre las mordazas debe ser de 2.000 milímetros más 8 veces el ancho (b) de la probeta, la cual se debe cargar hasta la falla. En la figura 4.18 se observa la aplicación de un ensayo de tracción paralela.

La resistencia a la tracción paralela ( $f_{t,0}$ ) se calcula como sigue:

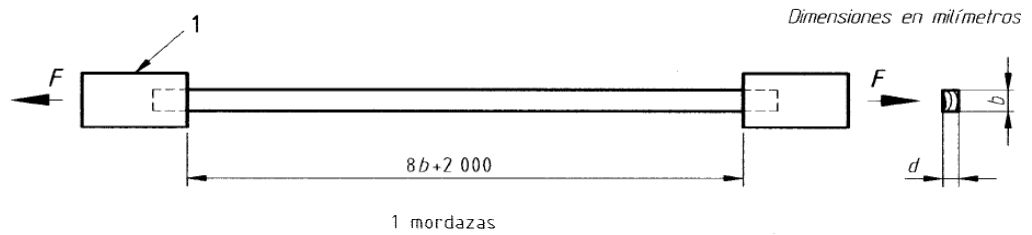
$$f_{t,0} = \frac{F_{\text{máx}}}{bd}$$

Donde,

$f_{t,0}$  : Resistencia a la tracción paralela a las fibras

$F_{\text{máx}}$  : Valor de la carga aplicada en la falla o carga máxima

- d : Espesor de la pieza de madera
- b : Ancho de la pieza de madera



**Figura 4.17:** Esquema de ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras.  
**Fuente:** NCh 3028/1.



**Figura 4.18:** Aplicación de un ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras.

**Fuente:** Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR).

#### 4.6.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LAS FIBRAS

El esquema de carga aplicada en el ensayo de compresión paralela a las fibras se ilustra en la figura 4.19. La pieza de madera debe tener una longitud total de 2.000 milímetros más 8 veces el ancho (b) de la probeta; esta se debe comprimir axialmente por medio de una carga hasta que se produzca la falla. El pandeo se controla con

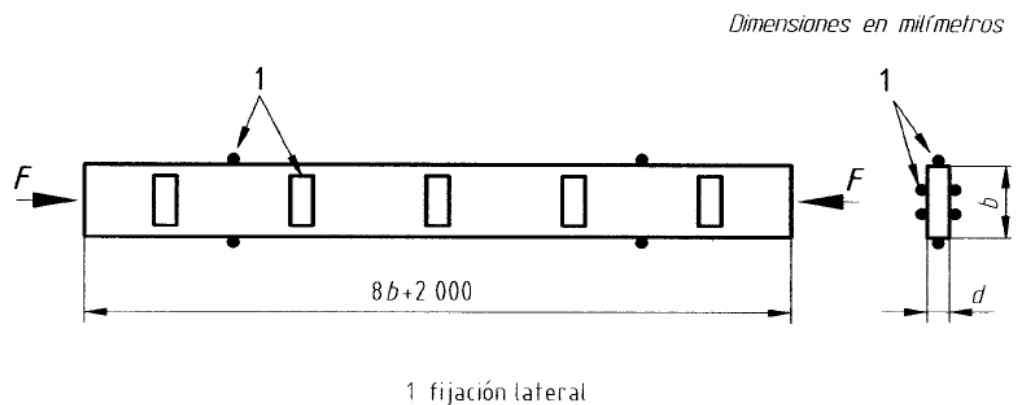
restricciones laterales distanciadas a 10 veces el ancho (b) para el pandeo respecto al eje menor, y de 10 veces el espesor (d) para el pandeo respecto al eje mayor. En la figura 4.20 se observa la aplicación de un ensayo de compresión paralela, donde se puede apreciar la zona de carga y los dispositivos de fijación lateral.

La resistencia a la compresión paralela ( $f_{c,0}$ ) se calcula como sigue:

$$f_{c,0} = \frac{F_{\text{máx}}}{bd}$$

Donde,

- $f_{c,0}$  : Resistencia a la compresión paralela a las fibras
- $F_{\text{máx}}$  : Valor de la carga aplicada en la falla o carga máxima
- d : Espesor de la pieza de madera
- b : Ancho de la pieza de madera



**Figura 4.19:** Esquema de ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras.

**Fuente:** NCh 3028/1.



**Figura 4.20:** Aplicación de un ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras.

**Fuente:** Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR).

#### 4.6.4. RESISTENCIA AL CIZALLE PARALELO A LAS FIBRAS

El esquema de carga aplicada en el ensayo de cizalle paralelo a las fibras se ilustra en la figura 4.21. La pieza de madera debe tener una longitud total de 8 veces el ancho (d) de la probeta; esta se debe someter a una carga de flexión en el punto central de la luz de apoyo hasta la falla (INN, 2006b). En la figura 4.22 se observa la aplicación de un ensayo de cizalle paralelo.

La resistencia al cizalle paralelo ( $f_v$ ) se calcula como sigue (INN, 2006b):

$$f_v = \frac{0,75 F_{\text{máx}}}{bd}$$

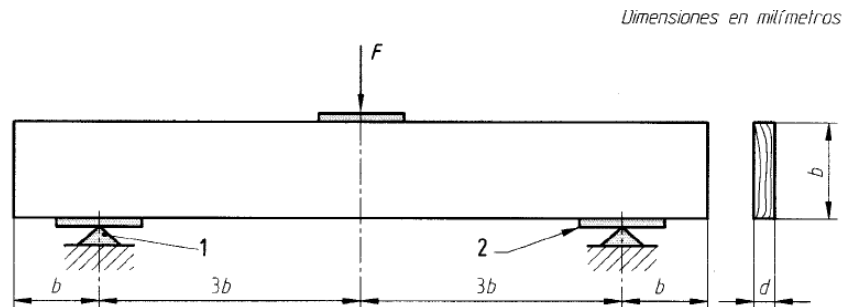
Donde,

$f_v$  : Resistencia al cizalle paralelo a las fibras.

$F_{\text{máx}}$  : Valor de la carga aplicada en la falla o carga máxima.

$d$  : Espesor de la pieza de madera.

$b$  : Ancho de la pieza de madera.



**Figura 4.21:** Esquema de ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras.

**Fuente:** INN, 2006b.



**Figura 4.22:** Aplicación de un ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras.

**Fuente:** Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR).

#### 4.7. DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES

##### 4.7.1. DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN

La determinación de valores admisibles para ensayos de flexión estática se encuentra normada por la 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”.

Esta norma especifica los procedimientos de muestreo y evaluación de las propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada de tamaño estructural clasificada por su resistencia. Además esta norma es útil para evaluar la validez de las propiedades asignadas y para verificar la efectividad de los procedimientos de clasificación estructural de la madera.

Los resultados de los ensayos de flexión estática realizados de acuerdo a la metodología establecida en la norma chilena NCh 3028/1 OF.2006 deben ser ajustados a condiciones de contenido de humedad único, apropiado para el objetivo del programa experimental. Generalmente el contenido de humedad único al que se ajustan los resultados es al 12%.

La ecuación de ajuste para el módulo de elasticidad estático en flexión es:

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

Donde,

$E_{f,12\%}$  : Módulo de elasticidad estático en flexión al 12% de contenido de humedad.

$E_f$  : Módulo de elasticidad estático en flexión determinado experimentalmente.

$H_1$  : Contenido de humedad medido, expresado en porcentaje.

$H_2$  : Contenido de humedad del 12%.

$B_1, B_2$  : Constantes según tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Constantes para el ajuste de contenido de humedad para el módulo de elasticidad estático en flexión.

Coefficientes	Valores
$B_1$	1,857
$B_2$	0,0237

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

La ecuación de ajuste para la tensión de rotura en flexión cuando  $f_m \leq 16,6$  MPa es:

$$f_{m,12\%} = f_m$$

Mientras que la ecuación de ajuste para la tensión de rotura en flexión cuando  $f_m \geq 16,6$  MPa es:

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

Donde,

$f_{m,12\%}$  : Tensión de rotura en flexión al 12% de contenido de humedad.

$f_m$  : Tensión de rotura en flexión determinado experimentalmente.

$H_1$  : Contenido de humedad medido, expresado en porcentaje.

$H_2$  : Contenido de humedad del 12%.

$B_1, B_2$  : Constantes según tabla 4.4.

**Tabla 4.4:** Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la tensión de rotura en flexión.

Coeficientes	Valores
B <sub>1</sub>	16,65
B <sub>2</sub>	40

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Otro ajuste que se le debe realizar al parámetro de módulo de elasticidad al 12% del contenido de humedad es la estandarización a valores aparentes. Es necesario considerar el caso en que no es posible realizar ensayos en condiciones de carga y de luz estandarizados, para ajustar  $E_{ai}$ , es necesario considerar el efecto del corte sobre la deformación de la viga. Los factores para ajustar  $E_{ai}$  en función de la razón luz/altura y configuración de carga se pueden derivar de la ecuación que describe a continuación. Para determinar el módulo de elasticidad aparente,  $E_{ai}$ , sobre la base de cualquier conjunto de condiciones de la razón luz/altura y configuración de cargas, cuando se conoce el módulo,  $E_{ai}$ , basado en cualquier otro conjunto de condiciones, se debe resolver la expresión:

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

Donde,

$E_{f,a}$  : Módulo de elasticidad en flexión aparente al 12% de contenido de humedad.

$h_1, h_2$  : Altura de la sección transversal de la viga.

$L_1, L_2$  : Distancia total entre los apoyos de la viga (Luz).

$E$  : Módulo de elasticidad libre del efecto del esfuerzo de corte.

$G$  : Módulo de rigidez.

$K_1$  : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de carga que desea atribuir su uso, valores indicados en la Tabla 4.5.

$K_2$  : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente a la situación de ensayo que fue medido, valores indicados en la Tabla 4.5.

Cuando se utilizan estas fórmulas de conversión con madera aserrada, históricamente se ha asumido que el módulo de rigidez (G) es 1/16 del módulo de elasticidad (E) de flexión pura (libre de efecto del esfuerzo del corte). Por lo que para el desarrollo de este estudio, se utilizó que la razón E/G es única para toda la población ensayada mediante la relación anteriormente descrita.

**Tabla 4.5:** Factores K para ajustar el módulo de elasticidad aparente de las vigas simplemente apoyadas.

Carga	Deflexión medida en:	$K_i$
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	1,20
Uniformemente distribuida	Mitad del tramo	0,960

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Para obtener los valores admisibles de los módulos de elasticidad y tensión de rotura en flexión estática, se debe realizar un ajuste con factores que se presentan en la tabla 4.6 a los valores obtenidos del módulo de elasticidad aparente y de la tensión de rotura al 12% de humedad. . Estos se han obtenido de ASTM D 245, que incluye un factor de seguridad y un efecto de duración acumulada de la carga de 10 años (carga normal).

**Tabla 4.6:** Factores de reducción para relacionar las estadísticas experimentales con las propiedades admisibles.

Propiedad	Factor
Módulo de elasticidad	1
Módulo de rotura a 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

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Para la determinación de los valores admisibles, la NCh3028/2 en su apartado 3 hace referencia a dos procedimientos de análisis general: paramétrico y no paramétrico. El enfoque paramétrico asume una distribución conocida de la población subyacente, una hipótesis que de ser incorrecta puede conducir a resultados imprecisos. Por ello, para este estudio se utilizó un enfoque paramétrico, se deben utilizar ensayos estadísticos apropiados para fundamentar esta decisión, en conjunto con mediciones de la pertinencia del ensayo. Como alternativa, un enfoque no paramétrico requiere menos hipótesis y es, generalmente, más conservador que un procedimiento paramétrico.

El enfoque no paramétrico establece que para estimar el valor admisible de la tensión de rotura, se debe encontrar el percentil 5% de los datos aparentes.

El proceso se lleva a cabo ordenando los valores de en forma ascendente y calculando, a partir de la menor resistencia, para cada valor la siguiente expresión:

$$\frac{i}{(n + 1)}$$

Donde,

$i$  : Orden del valor.

$n$  : Tamaño de la muestra.

Luego se debe verificar que:

$$\frac{i}{(n + 1)} \geq \frac{k}{100}$$

Donde,

$k$  : Nivel de exclusión o percentil considerado (5)

Si se encuentra aquel valor que esté justo en el nivel de exclusión del 5%, ese es el valor que se utilizará para obtener el valor admisible de la tensión de rotura. En caso contrario, se debe estimar el punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN) mediante interpolación, utilizando la siguiente expresión:

$$EPN = \left[ \frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)}$$

Donde,

$j$  : Valor ordinal  $j^{\text{ésimo}}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

$x_j$  : Valor  $j^{\text{ésimo}}$  de  $f_{m, adm}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

Para el caso del módulo de elasticidad, el valor admisible que se le asocia es el valor promedio de la muestra. El promedio de la muestra se calcula de la siguiente forma:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

Donde,

$x_i$  : Observaciones individuales.

#### 4.7.2. DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN

La determinación de valores admisibles para ensayos de compresión paralela a la fibra se encuentra normada por la 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”.

Esta norma especifica los procedimientos de muestreo y evaluación de las propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada de tamaño estructural clasificada por su resistencia. Además esta norma es útil para evaluar la validez de las propiedades asignadas y para verificar la efectividad de los procedimientos de clasificación estructural de la madera.

Los resultados de los ensayos de compresión paralela a la fibra realizados de acuerdo a la metodología establecida en la norma chilena NCh 3028/1 OF.2006 deben ser ajustados a condiciones de contenido de humedad único, apropiado para el objetivo del programa experimental. Generalmente el contenido de humedad único al que se ajustan los resultados es al 12%.

La ecuación de ajuste para la resistencia a la compresión paralela a la fibra cuando  $f_c \leq 9,65$  MPa es:

$$f_{c,12\%} = f_c$$

Mientras que la ecuación de ajuste para la resistencia a la compresión paralela a la fibra cuando  $f_c \geq 9,65$  MPa es:

$$f_{c,12\%} = f_c + \left\{ \frac{(f_c - B_1)}{(B_2 - H_1)} \right\} (H_1 - H_2)$$

Donde,

$f_{c,12\%}$  : Resistencia a la compresión al 12% de contenido de humedad.

$f_c$  : Resistencia a la compresión determinado experimentalmente.

$H_1$  : Contenido de humedad medido, expresado en porcentaje.

$H_2$  : Contenido de humedad del 12%.

$B_1, B_2$  : Constantes según tabla 4.7.

**Tabla 4.7:** Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la resistencia a la compresión paralela a la fibra.

Coefficientes	Valores
$B_1$	9,65
$B_2$	34

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Para la determinación de los valores admisibles, la NCh3028/2 en su apartado 3 hace referencia a dos procedimientos de análisis general: paramétrico y no paramétrico. El enfoque paramétrico asume una distribución conocida de la población subyacente, una hipótesis que de ser incorrecta puede conducir a resultados imprecisos. Por ello, para este estudio se utilizó un enfoque paramétrico, se deben utilizar ensayos estadísticos apropiados para fundamentar esta decisión, en conjunto con mediciones de la pertinencia del ensayo. Como alternativa, un enfoque no

paramétrico requiero menos hipótesis y es, generalmente, más conservador que un procedimiento paramétrico.

El enfoque no paramétrico establece que para estimar el valor admisible de la resistencia a la compresión paralela, se debe encontrar el percentil 5% de los datos aparentes.

El proceso se lleva a cabo ordenando los valores de en forma ascendente y calculando, a partir de la menor resistencia, para cada valor la siguiente expresión:

$$\frac{i}{(n + 1)}$$

Donde,

$i$  : Orden del valor.

$n$  : Tamaño de la muestra.

Luego se debe verificar que:

$$\frac{i}{(n + 1)} \geq \frac{k}{100}$$

Donde,

$k$  : Nivel de exclusión o percentil considerado (5)

Si se encuentra aquel valor que esté justo en el nivel de exclusión del 5%, ese es el valor que se utilizará para obtener el valor admisible de la tensión de rotura. En caso contrario, se debe estimar el punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN) mediante interpolación, utilizando la siguiente expresión:

$$EPN = \left[ \frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)}$$

Donde,

$j$  : Valor ordinal  $j^{\text{ésimo}}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

$x_j$  : Valor  $j^{\text{ésimo}}$  de  $f_{m, adm}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

#### 4.7.3. DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

La determinación de valores admisibles para ensayos de tracción paralela a la fibra se encuentra normada por la 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”.

Esta norma específica los procedimientos de muestreo y evaluación de las propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada de tamaño estructural clasificada por su resistencia. Además esta norma es útil para evaluar la validez de las propiedades asignadas y para verificar la efectividad de los procedimientos de clasificación estructural de la madera.

Los resultados de los ensayos de tracción paralela a la fibra realizados de acuerdo a la metodología establecida en la norma chilena NCh 3028/1 OF.2006 deben ser ajustados a condiciones de contenido de humedad único, apropiado para el objetivo del programa experimental. Generalmente el contenido de humedad único al que se ajustan los resultados es al 12%.

La ecuación de ajuste para la resistencia a la tracción paralela a la fibra cuando  $f_t \leq 21,7$  MPa es:

$$f_{t,12\%} = f_t$$

Mientras que la ecuación de ajuste para la resistencia a la tracción paralela a la fibra cuando  $f_t \geq 21,7$  MPa es:

$$f_{t,12\%} = f_t + \left\{ \frac{(f_t - B_1)}{(B_2 - H_1)} \right\} (H_1 - H_2)$$

Donde,

$f_{t,12\%}$  : Resistencia a la tracción paralela a la fibra al 12% de contenido de humedad.

$f_t$  : Resistencia a la tracción paralela a la fibra determinado experimentalmente.

$H_1$  : Contenido de humedad medido, expresado en porcentaje.

$H_2$  : Contenido de humedad del 12%.

$B_1, B_2$  : Constantes según tabla 4.8.

**Tabla 4.8:** Constantes para el ajuste de contenido de humedad para la resistencia a la tracción paralela a la fibra.

Coeficientes	Valores
$B_1$	21,72
$B_2$	80

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Para la determinación de los valores admisibles, la NCh3028/2 en su apartado 3 hace referencia a dos procedimientos de análisis general: paramétrico y no paramétrico. El enfoque paramétrico asume una distribución conocida de la población subyacente, una hipótesis que de ser incorrecta puede conducir a resultados imprecisos. Por ello, para este estudio se utilizó un enfoque paramétrico, se deben utilizar ensayos estadísticos apropiados para fundamentar esta decisión, en conjunto

con mediciones de la pertinencia del ensayo. Como alternativa, un enfoque no paramétrico requiere menos hipótesis y es, generalmente, más conservador que un procedimiento paramétrico.

El enfoque no paramétrico establece que para estimar el valor admisible de la resistencia a la tracción paralela, se debe encontrar el percentil 5% de los datos aparentes.

El proceso se lleva a cabo ordenando los valores de en forma ascendente y calculando, a partir de la menor resistencia, para cada valor la siguiente expresión:

$$\frac{i}{(n + 1)}$$

Donde,

$i$  : Orden del valor.

$n$  : Tamaño de la muestra.

Luego se debe verificar que:

$$\frac{i}{(n + 1)} \geq \frac{k}{100}$$

Donde,

$k$  : Nivel de exclusión o percentil considerado (5)

Si se encuentra aquel valor que esté justo en el nivel de exclusión del 5%, ese es el valor que se utilizará para obtener el valor admisible de la tensión de rotura. En caso contrario, se debe estimar el punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN) mediante interpolación, utilizando la siguiente expresión:

$$EPN = \left[ \frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)}$$

Donde,

$j$  : Valor ordinal  $j^{\text{ésimo}}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

$x_j$  : Valor  $j^{\text{ésimo}}$  de  $f_{m, adm}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

#### 4.7.4. DETERMINACIÓN DE VALORES ADMISIBLES PARA ENSAYOS DE CIZALLE

La determinación de valores admisibles para ensayos de cizalle paralelo a la fibra se encuentra normada por la 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”.

Esta norma especifica los procedimientos de muestreo y evaluación de las propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada de tamaño estructural clasificada por su resistencia. Además esta norma es útil para evaluar la validez de las propiedades asignadas y para verificar la efectividad de los procedimientos de clasificación estructural de la madera.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la tracción paralela a la fibra realizados de acuerdo a la metodología establecida en la norma chilena NCh 3028/1 OF.2006 deben ser ajustados a condiciones de contenido de humedad único, apropiado para el objetivo del programa experimental. Generalmente el contenido de humedad

único al que se ajustan los resultados es al 12%.

La ecuación de ajuste para resistencia al cizalle paralelo a la fibra es:

$$f_{v,12\%} = f_v \left\{ \frac{(B_1 - (B_2 H_2))}{(B_1 - (B_2 H_1))} \right\}$$

Donde,

$f_{v,12\%}$ : Resistencia al cizalle paralelo a la fibra al 12% de contenido de humedad.

$f_v$ : Resistencia a al cizalle paralelo a la fibra determinado experimentalmente.

$H_1$ : Contenido de humedad medido, expresado en porcentaje.

$H_2$ : Contenido de humedad del 12%.

$B_1, B_2$ : Constantes según tabla 4.9.

**Tabla 4.9:** Constantes para el ajuste de contenido de humedad para resistencia al cizalle paralelo a la fibra.

Coefficientes	Valores
$B_1$	1,33
$B_2$	0,0167

Fuente: NCh 3028/2 of. 2008.

Para la determinación de los valores admisibles, la NCh3028/2 en su apartado 3 hace referencia a dos procedimientos de análisis general: paramétrico y no paramétrico. El enfoque paramétrico asume una distribución conocida de la población subyacente, una hipótesis que de ser incorrecta puede conducir a resultados imprecisos. Por ello, para este estudio se utilizó un enfoque paramétrico, se deben utilizar ensayos estadísticos apropiados para fundamentar esta decisión, en conjunto con mediciones de la pertinencia del ensayo. Como alternativa, un enfoque no

paramétrico requiero menos hipótesis y es, generalmente, más conservador que un procedimiento paramétrico.

El enfoque no paramétrico establece que para estimar el valor admisible de la resistencia al cizalle paralelo, se debe encontrar el percentil 5% de los datos aparentes.

El proceso se lleva a cabo ordenando los valores de en forma ascendente y calculando, a partir de la menor resistencia, para cada valor la siguiente expresión:

$$\frac{i}{(n + 1)}$$

Donde,

$i$  : Orden del valor.

$n$  : Tamaño de la muestra.

Luego se debe verificar que:

$$\frac{i}{(n + 1)} \geq \frac{k}{100}$$

Donde,

$k$  : Nivel de exclusión o percentil considerado (5)

Si se encuentra aquel valor que esté justo en el nivel de exclusión del 5%, ese es el valor que se utilizará para obtener el valor admisible de la tensión de rotura. En caso contrario, se debe estimar el punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN) mediante interpolación, utilizando la siguiente expresión:

$$EPN = \left[ \frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)}$$

Donde,

$j$  : Valor ordinal  $j^{\text{ésimo}}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

$x_j$  : Valor  $j^{\text{ésimo}}$  de  $f_{m, adm}$  que excede el estimador del punto porcentual  $k$  de la muestra.

## 4.8. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

### 4.8.1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Para obtener un modelo explicativo que relacione el módulo de elasticidad a flexión estática, resistencia a flexión, resistencia a compresión, resistencia a cizalle, resistencia a tracción y el módulo de elasticidad dinámico, se debe considerar el uso de herramientas estadísticas. Lo primero fue realizar una regresión, que en estadística es un método matemático que modela la relación entre una variable dependiente, una variable independiente y un término aleatorio.

Todos los datos conforman una distribución bidimensional dada y pueden representarse gráficamente en un par de ejes de coordenadas. A esta representación gráfica se le denomina indistintamente diagrama de dispersión o nube de puntos. Esta se realizó a través del software Microsoft Excel 2013.

El problema consiste en unir varios puntos de ese conjunto o nube de puntos, mediante un ajuste, ya sea rectilíneo, parabólico, exponencial o de cualquier otro tipo de línea que represente al conjunto. El tipo de línea que se relaciona dependerá de la forma que asuma el conjunto de puntos, al hacer la respectiva gráfica. En general, se dice que la curva que minimiza la suma de los cuadrados de las desviaciones entre puntos dados, dicha línea es la mejor.

Para este estudio sólo se realizaron ajustes lineales, con la finalidad de poder comparar los resultados con estudios similares anteriores y establecer condiciones iguales para la discusión.

Por lo tanto, a los datos se le ajustó una recta, cuya ecuación general es:

$$y = a + bx$$

Donde,

y : Variable dependiente o respuesta del modelo.

x : Variable independiente o explicativa del modelo.

a : Parámetro constante o intersección.

b : Parámetro que mide la influencia que tiene la variable explicativa sobre la variable respuesta.

La regresión lineal se hizo mediante el software Microsoft Office 2013, obteniéndose inmediatamente la ecuación de la recta ajustada.

Como lo que se desea obtener en este estudio es el módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámico, la variable respuesta corresponde a  $E_{f,12\%}$ , mientras que la variable explicativa del modelo corresponde a  $E_d$ .

Luego de tener el modelo conformado, se debe verificar estadísticamente el porcentaje de ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal que se ha estimado.

El parámetro conocido como coeficiente de determinación  $R^2$  indica el grado de ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal. El grado de ajuste conseguido 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 la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{\sigma^2_{XY}}{\sigma^2_X \sigma^2_Y}$$

Donde,

$R^2$  : Coeficiente de determinación.

$\sigma_{xy}$  : Covarianza de (X, Y).

$\sigma_x$  : Desviación típica de la variable X.

$\sigma_y$  : Desviación típica de la variable Y.

Mientras más cercano a 1 esté  $R^2$ , mejor es el modelo para predecir el comportamiento de la variable dependiente. El valor de  $R^2$  siempre estará entre 0 y 1 y siempre es igual al cuadrado del coeficiente de correlación (R). Para esta investigación, el  $R^2$  fue obtenido automáticamente el software Microsoft Excel 2013.

#### 4.8.2. DETERMINACIÓN DE GRADOS ESTRUCTURALES

El método más común para clasificar madera mediante algún método no destructivo, y el que se utilizó en esta investigación, es por medio del módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y la tensión de rotura  $f_m$ .

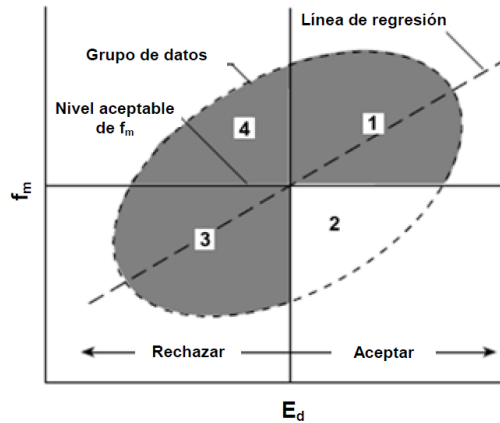
El módulo de elasticidad es un predictor imperfecto de la resistencia de un material y por lo mismo de la tensión de rotura. Por lo anterior, la madera estructural que se clasifica mediante una relación lineal de los dos parámetros mencionados anteriormente, cae en una de las cuatro categorías que se presentan en la figura 4.23, las cuales se especifican a continuación (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.



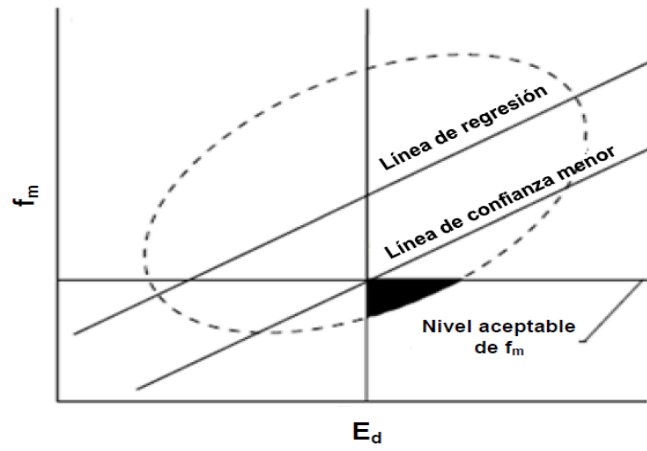
**Figura 4.23:** Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de regresión como predictor.

**Fuente:** Modificado de Green, D., 1999

Por lo tanto, para el caso ilustrado en la figura 4.23, se trabaja correctamente para las categorías 1, 3 y 4, pero de forma incorrecta para la categoría 2, por lo que estas piezas presentan un problema. Estas piezas son aceptadas teniendo una tensión de rotura inferior al que requiere el grado, y se mezclan con las aceptadas de la categoría 1.

El número de piezas que caen en la categoría 2 depende de la variabilidad del modelo de predicción. Para reducir al mínimo las asignaciones a esta categoría, se realiza un nuevo modelo de ajuste que minimiza la asignación a la categoría 2, o al menos lo reduce a un nivel de riesgo más bajo.

Comúnmente, el nuevo modelo de predicción incorpora una línea de confianza inferior (Ver figura 4.24), la cual corresponde a la misma línea de regresión desplazada hasta el punto donde se establece el  $f_m$  admisible del grado, así el número de piezas que caen en la categoría 2 es ahora más bajo en comparación al modelo de la línea de regresión, estableciendo un nivel de rechazo para cada grado estructural.



**Figura 4.24:** Esquema de clasificación estructural con el uso de una línea de confianza menor como predictor.

**Fuente:** Modificado de Green, D., 1999.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

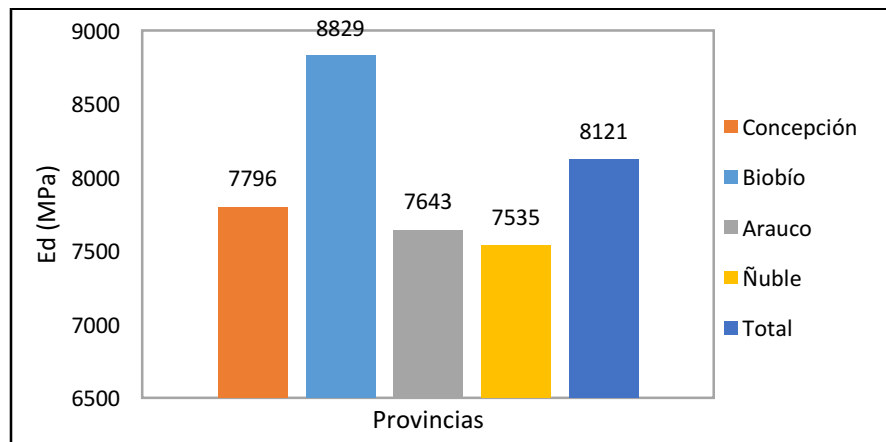
### 5.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

Del ensayo no destructivo realizado con el Timber Grader MTG se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y densidad por provincias.

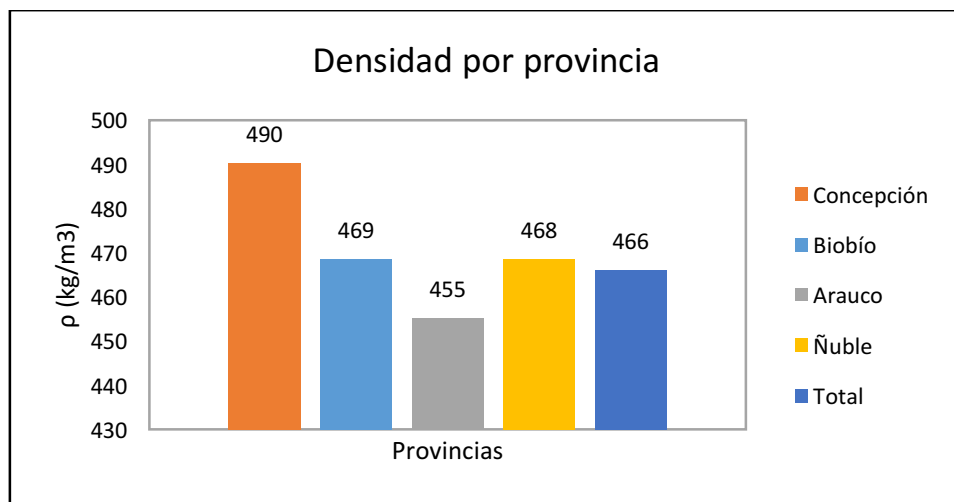
Provincia	Concepción		Biobío		Arauco		Ñuble		Total	
	$E_d$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E_d$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E_d$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E_d$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E_d$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Media	7796	490	8829	469	7643	455	7535	468	8121	466
Desv. Estándar	1444	51	1827	51	1694	51	1939	51	1912	51
Máximo	11673	655	18464	665	12335	615	13211	671	18464	671
Mínimo	4480	399	4099	308	3245	101	3047	111	3047	101
N° Elem.	76	76	773	773	454	454	523	523	1826	1826

El módulo de elasticidad tiene un mayor valor en la provincia de Biobío con respecto al resto de provincias, sin embargo, la mayor densidad se registró en la provincia de Concepción (ver figura 5.1), así también las provincias que registraron menores valores tanto de módulo de elasticidad como de densidad fueron, Ñuble y Arauco respectivamente (ver figura 5.2).



**Figura 5.1:** Grafico de barras, módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por provincias.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.



**Figura 5.2:** Grafico de barras, densidad promedio por provincias.  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

## 5.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

### 5.2.1. RESISTENCIA A FLEXIÓN

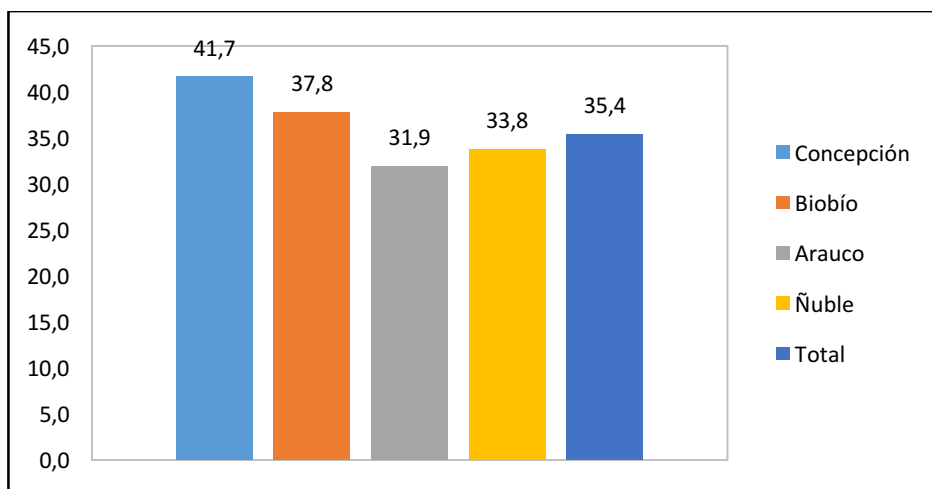
A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas sometidas a flexión, los cuales se aprecian en la tabla 5.2 y la figura 5.3 en donde se muestran los valores promedios de la resistencia a flexión ( $f_m$ ) para las distintas provincias, para un total de 446 probetas.

En la tabla 5.2 se observa que en la provincia de Concepción se obtiene la mayor resistencia a flexión media y la menor en la provincia de Arauco, esto también se observa de forma gráfica en la figura 5.3.

**Tabla 5.2:** Resultados obtenidos para el ensayo de flexión, para las distintas provincias.

Ensayo		Flexión	
Provincias		Ed(MPa)	fm (MPa)
Concepción	Media	7726	41,7
	Desv. Estándar	1561	18,2

	Máximo	10386	89,7
	Mínimo	5436	17,2
	N° Elem.	19	19
Biobío	Media	8122	37,8
	Desv. Estándar	1558	18,5
	Máximo	13025	91,4
	Mínimo	4099	0,6
	N° Elem.	195	195
Arauco	Media	6901	31,9
	Desv. Estándar	1495	16,9
	Máximo	10798	71,5
	Mínimo	3245	4,1
	N° Elem.	114	114
Ñuble	Media	6896	33,8
	Desv. Estándar	1631	13,9
	Máximo	11262	67,4
	Mínimo	3047	1,6
	N° Elem.	118	118
Total	Media	7946	35,4
	Desv. Estándar	2162	17,2
	Máximo	16213	91,4
	Mínimo	1661	0,6
	N° Elem.	446	446



**Figura 5.3:** Valores promedios de resistencia a flexión paralela ( $f_m$ ), para 446 probetas.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 5.2.1.1. TIPOS DE FALLAS OBTENIDAS EN PROBETAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

En el ensayo de flexión se evidenció fallas típicas por tracción en las fibras inferiores de las vigas y compresión en las fibras sobre el eje neutro, ver figura 5.4.



**Figura 5.4:** Fallas registradas en las probetas sometidas a flexión paralela a la fibra.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

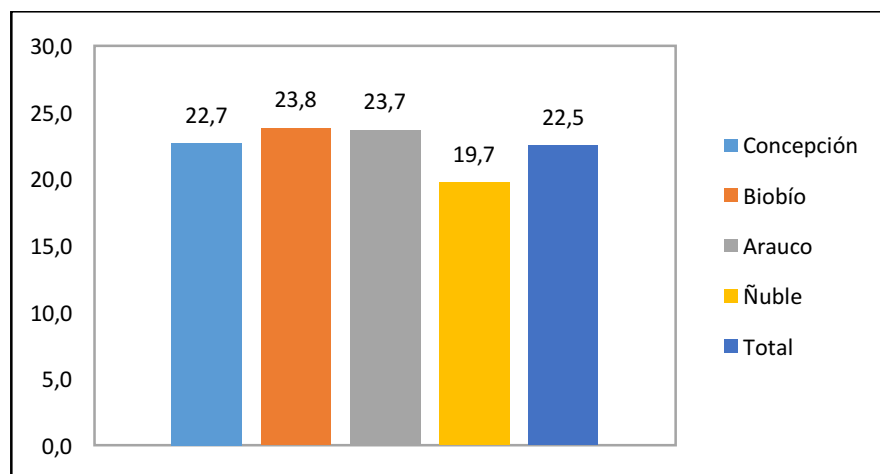
### 5.2.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas sometidas a compresión paralela, los cuales se aprecian en la tabla 5.3 y la figura 5.5 en donde se muestran los valores promedios de la resistencia a compresión ( $f_{(c,0)}$ ) para las distintas provincias, para un total de 467 probetas.

En la tabla 5.3 se observa que en la provincia de Biobío se obtiene la mayor resistencia a la compresión media y la menor en la provincia de Ñuble, esto también se observa de forma gráfica en la figura 5.5.

**Tabla 5.3:** Resultados obtenidos para el ensayo de compresión paralela, para las distintas provincias.

Ensayo		Compresión Paralela	
Provincias		$E_d$ (MPa)	$f_{(c,0)}$ (MPa)
Concepción	Media	7754	22,7
	Desv. Estándar	1415	5,0
	Máximo	10644	39,1
	Mínimo	5510	18,1
	N° Elem.	19	19
Biobío	Media	9073	23,8
	Desv. Estándar	1521	5,9
	Máximo	13330	47,1
	Mínimo	5241	10,1
	N° Elem.	192	192
Arauco	Media	8469	23,7
	Desv. Estándar	1457	4,8
	Máximo	11925	33,2
	Mínimo	5146	7,7
	N° Elem.	114	114
Ñuble	Media	7435	19,7
	Desv. Estándar	1966	5,1
	Máximo	11424	32,9
	Mínimo	3546	1,2
	N° Elem.	142	142
Total	Media	8374	22,5
	Desv. Estándar	1788	5,7
	Máximo	13330	47,1
	Mínimo	3546	1,2
	N° Elem.	467	467



**Figura 5.5:** Valores promedios de resistencia a compresión paralela ( $f_{c,0}$ ), para 467 probetas.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 5.2.2.1. TIPOS DE FALLAS OBTENIDAS EN PROBETAS SOMETIDAS A COMPRESIÓN

En los ensayos de compresión paralela se observó la compresión de las fibras sin efectos de pandeo, esto se aprecia en la figura 5.6



**Figura 5.6:** Fallas registradas en las probetas sometidas a compresión paralela a la fibra.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 5.2.3. RESISTENCIA A CIZALLE

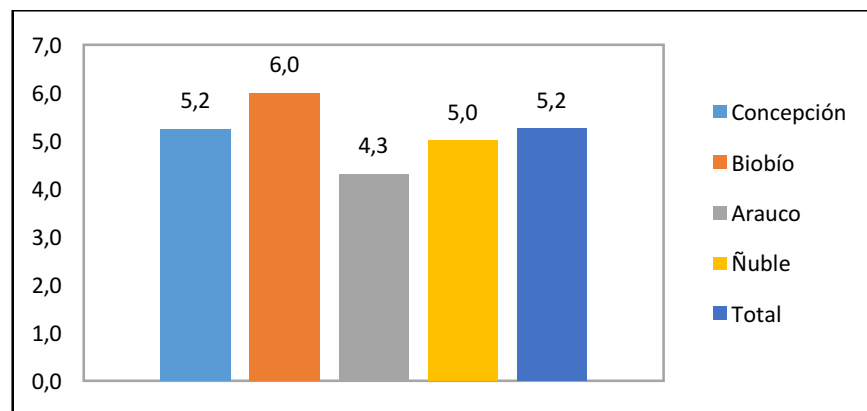
A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas sometidas a cizalle paralelo, los cuales se aprecian en la tabla 5.4 y la figura 5.7 en donde se muestran los valores promedios de la resistencia a cizalle ( $f_v$ ) para las distintas provincias, para un total de 466 probetas.

En la tabla 5.4 se observa que en la provincia de Biobío se obtiene la mayor resistencia a cizalle media y la menor en la provincia de Arauco, esto también se observa de forma gráfica en la figura 5.7.

**Tabla 5.4:** Resultados obtenidos para el ensayo de cizalle paralelo, para las distintas provincias.

Ensayo		Cizalle Paralelo	
Provincias		$E_d$ (MPa)	$f_v$ (MPa)
Concepción	Media	8252	5,2

	Desv. Estándar	1618	1,8
	Máximo	11673	7,8
	Mínimo	5158	1,6
	N° Elem.	19	19
Biobío	Media	8884	6,0
	Desv. Estándar	1704	1,8
	Máximo	12527	9,6
	Mínimo	4746	0,2
	N° Elem.	191	191
Arauco	Media	6784	4,3
	Desv. Estándar	1450	1,3
	Máximo	10983	7,5
	Mínimo	3922	0,6
	N° Elem.	112	112
Ñuble	Media	8200	5,0
	Desv. Estándar	1675	1,2
	Máximo	12892	8,0
	Mínimo	3331	0,4
	N° Elem.	144	144
Total	Media	8142	5,2
	Desv. Estándar	1823	1,6
	Máximo	12892	9,6
	Mínimo	3331	0,2
	N° Elem.	466	466

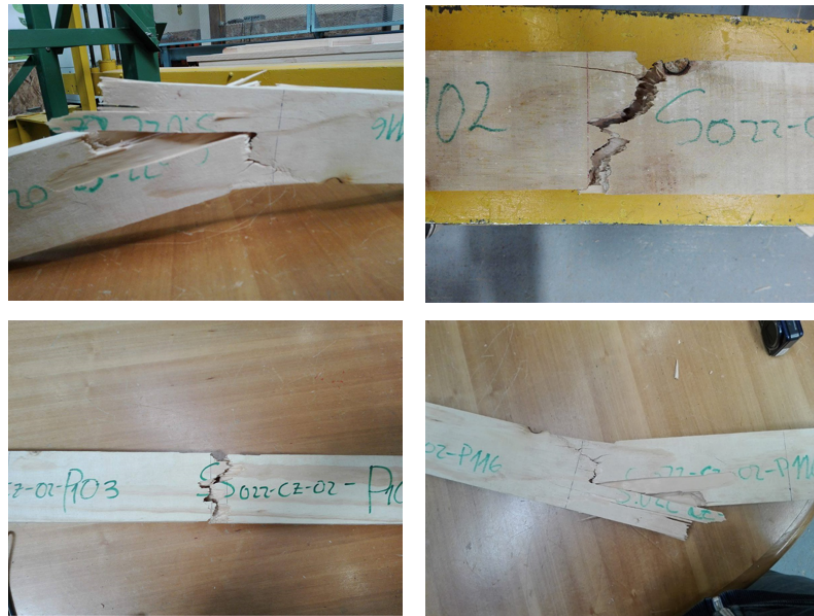


**Figura 5.7:** Valores promedios de resistencia a cizalle paralelo ( $f_v$ ), para 466 probetas.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 5.2.3.1. TIPOS DE FALLAS OBTENIDAS EN PROBETAS SOMETIDAS A CIZALLE

En los ensayos cizalle paralelo se observaron fallas por tracción en las fibras inferiores estas se observan en la figura 5.8.



**Figura 5.8:** Fallas registradas en las probetas sometidas a cizalle paralelo a la fibra.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

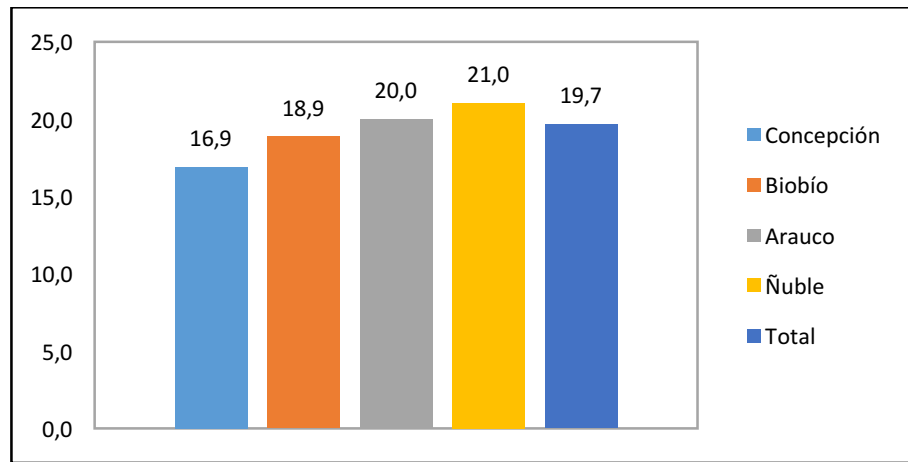
### 5.2.4. RESISTENCIA A TRACCIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas sometidas a tracción paralela, los cuales se aprecian en la tabla 5.5 y la figura 5.9 en donde se muestran los valores promedios de la resistencia a tracción ( $f_{(t,0)}$ ) para las distintas provincias, para un total de 447 probetas.

En la tabla 5.5 se observa que en la provincia de Ñuble se obtiene la mayor resistencia a tracción media y la menor en la provincia de Concepción, esto también se observa de forma gráfica en la figura 5.9.

**Tabla 5.5:** Resultados obtenidos para el ensayo de tracción paralela, para las distintas provincias.

Ensayo		Tracción Paralela	
Provincias		$E_d$ (MPa)	$f_{(t,0)}$ (MPa)
Concepción	Media	7454	16,9
	Desv. Estándar	1133	6,8
	Máximo	9779	40,0
	Mínimo	4480	9,8
	N° Elem.	19	19
Biobío	Media	9241	18,9
	Desv. Estándar	2237	13,4
	Máximo	18464	71,9
	Mínimo	5136	2,3
	N° Elem.	195	195
Arauco	Media	8404	20,0
	Desv. Estándar	1587	12,4
	Máximo	12335	72,0
	Mínimo	5450	0,6
	N° Elem.	114	114
Ñuble	Media	7484	21,0
	Desv. Estándar	2238	17,5
	Máximo	13211	86,5
	Mínimo	3266	3,5
	N° Elem.	119	119
Total	Media	8484	19,7
	Desv. Estándar	2181	14,2
	Máximo	18464	86,5
	Mínimo	3266	0,6
	N° Elem.	447	447



**Figura 5.9:** Valores promedios de resistencia a tracción paralela ( $f(t, 0)$ ), para 447 probetas.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 5.2.4.1. TIPOS DE FALLAS OBTENIDAS EN PROBETAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

En los ensayos de tracción paralela se observaron fallas en las fibras por tracción pura, ver figura 5.10.



**Figura 5.10:** Falla registrada en las probetas sometidas a tracción paralela a la fibra.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 5.3. MODELO DE CORRELACIÓN DE $E_f$ , $\rho$ Y $E_d$

De los resultados obtenidos de  $E_f$  y de  $E_d$  para todo el universo de muestras, además de la densidad, se obtuvieron tres modelos, en el primero se considera el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ), en el segundo modelo se utiliza la densidad ( $\rho$ ), el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y el módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ), el tercer modelo es considerando la multiplicación del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la densidad ( $\rho$ ) como una sola variable y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ).

A continuación se presentan los valores que fueron obtenidos directamente del software de procesamiento estadístico *InfoStat*, el cual mediante un análisis de varianza ANOVA, otorgó la información necesaria para probar la hipótesis de que el módulo de elasticidad dinámico y la densidad responde al modelo de relación lineal. Este análisis lo que hace es dividir la variación total de las observaciones en fuentes de variación, estas fuentes son el modelo en sí y la residual debida al error experimental. A través de la comparación de la variación debida a la hipótesis con la residual, se puede decidir acerca de la hipótesis. Si la variación es mayormente provocada por la hipótesis, entonces la hipótesis es cierta. En los tres casos descritos anteriormente el módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ) es considerada la variable dependiente.

Para el primer caso en donde se consideran  $E_d$  y  $E_f$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$  y  $E_f$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$E_f$ (MPa)	446	0,69	0,69

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Constante	-112,52	-624,54	399,5	-0,43	0,666
E <sub>d</sub> (MPa)	1,079	1,01	1,15	31,69	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo	1442144703	1	1442144703	1004,42	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	1442144703	1	1442144703	1004,42	<0,0001
Error	637491368,4	444	1435791,37		
Total	2079636072	445			

Donde,

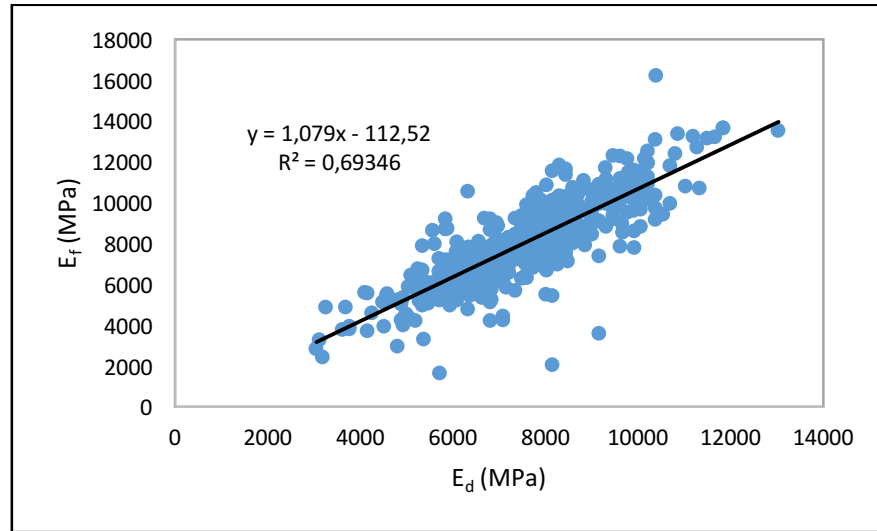
- N : Número de datos.
- R<sup>2</sup> : Coeficiente de determinación.
- R<sup>2</sup> Aj : Coeficiente de determinación ajustado.
- Est. : Estadígrafo.
- LI : Límite Inferior.
- LS : Límite Superior.
- T : Estadístico T.
- SC : Suma de los cuadrados.
- gl : Grados de libertad.
- CM : Promedio de los Cuadrados.

De la tabla 5.6 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir, E<sub>d</sub> aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.6 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.11 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 1,079x - 112,52$$

De la tabla 5.6 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.11 se observa que el modelo es capaz de explicar un 69,35% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.11:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ).  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016

Para el segundo caso en donde se consideran  $E_d$ ,  $\rho$  y  $E_f$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.7.

**Tabla 5.7:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$ , densidad y  $E_f$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$E_f$ (MPa)	446	0,75	0,74

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Constante	-4597,57	-5629,22	-3565,92	-8,76	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	1	0,94	1,06	31,18	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	10,89	8,65	13,12	9,58	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	1551544461	2	775772230,6	650,77	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	1159065798	1	1159065798	972,31	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	109399757,8	1	109399757,8	91,77	<0,0001
Error	528091610,6	443	1192080,39		
Total	2079636072	445			

De la tabla 5.7 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir, E<sub>d</sub> y ρ aportan y explican el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.7 en la sección “Coeficientes de regresión y estadísticos asociados” se desprende la siguiente ecuación que se ajusta de manera lineal:

$$y = x_1 + 10,89x_2 - 4597,57$$

Donde,

- X<sub>1</sub> : Variable dependiente de E<sub>d</sub> (MPa)
- X<sub>2</sub> : Variable dependiente de ρ

De la tabla 5.7 en la sección “Análisis de regresión lineal” se observa que el modelo es capaz de explicar un 75% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el resto no es explicado del todo.

Para el tercer caso en donde se consideran E<sub>d</sub>\*ρ y E<sub>f</sub> se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.8.

**Tabla 5.8:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d*\rho$  y  $E_f$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$E_f$ (MPa)	446	0,74	0,74

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	1060,22	670,33	1450,11	5,34	<0,0001
$E_d*\rho$	2,00E-03	1,90E-03	2,10E-03	35,96	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

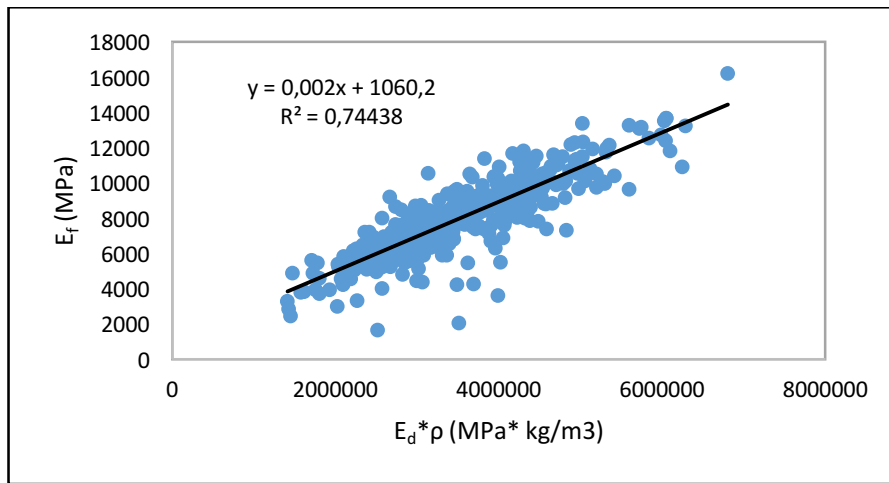
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo	1548045925	1	1548045925	1292,97	<0,0001
$E_d*\rho$	1548045925	1	1548045925	1292,97	<0,0001
Error	531590146,8	444	1197275,11		
Total	2079636072	445			

De la tabla 5.8 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d*\rho$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.8 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.12 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 0,002x + 1060,2$$

De la tabla 5.8 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.12 se observa que el modelo es capaz de explicar un 74,4% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.12:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y  $E_f$ .

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

#### 5.4. MODELO DE CORRELACIÓN DE $f_m$ , $\rho$ Y $E_d$

De los resultados obtenidos de  $f_m$  y de  $E_d$  para todo el universo de muestras, además de la densidad, se obtuvieron tres modelos, en el primero se considera el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a flexión ( $f_m$ ), en el segundo modelo se utiliza la densidad ( $\rho$ ), el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión ( $f_m$ ), el tercer modelo es considerando la multiplicación del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la densidad ( $\rho$ ) como una sola variable y resistencia a flexión ( $E_f$ ).

A continuación se presentan los valores que fueron obtenidos directamente del software de procesamiento estadístico *InfoStat*, el cual mediante un análisis de varianza ANOVA, otorgó la información necesaria para probar la hipótesis de que el módulo de elasticidad dinámica y la densidad responden al modelo de relación lineal. Este análisis lo que hace es dividir la variación total de las observaciones en fuentes de variación, estas fuentes son el modelo en sí y la residual debida al error experimental. A través de la comparación de la variación debida a la hipótesis con la

residual, se puede decidir acerca de la hipótesis. Si la variación es mayormente provocada por la hipótesis, entonces la hipótesis es cierta.

En los tres casos descritos anteriormente la resistencia a flexión ( $f_m$ ) es considerada la variable dependiente.

Para el primer caso en donde se consideran  $E_d$  y  $f_m$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.9.

**Tabla 5.9:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$  y  $f_m$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_m$ [MPa]	446	0,2	0,2

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
Const.	0,96	-5,59	7,52	0,29	0,7726
$E_d$ (MPa)	4,60E-03	3,80E-03	0,01	10,57	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

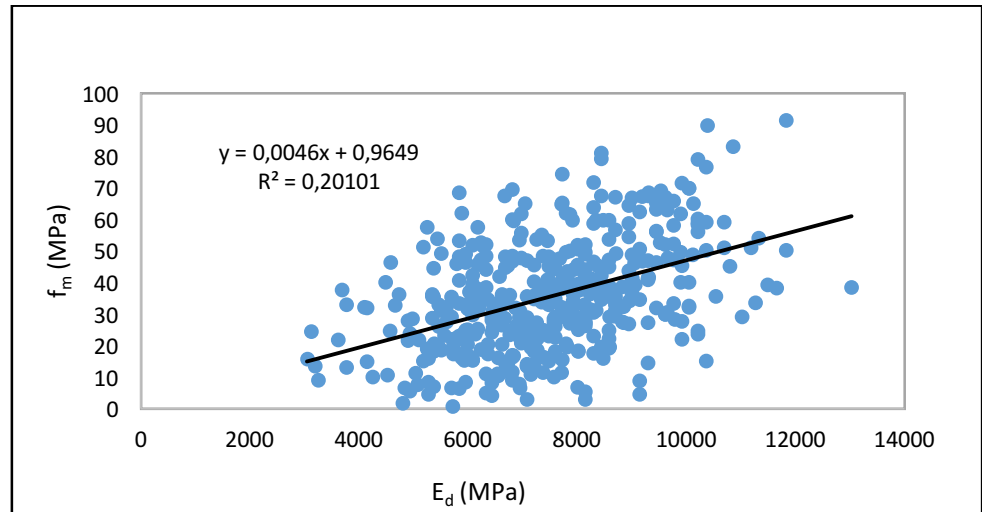
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	26321,18	1	26321,18	111,7	<0,0001
$E_d$ (MPa)	26321,18	1	26321,18	111,7	<0,0001
Error	104625,86	444	235,64		
Total	130947,05	445			

De la tabla 5.9 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.9 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.13 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 0,0046x + 0,9649$$

De la tabla 5.9 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.13 se observa que el modelo es capaz de explicar un 20,10% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.13:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a flexión ( $f_m$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

Para el segundo caso en donde se consideran  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_m$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.10.

**Tabla 5.10:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_m$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$f_v$ [MPa]	446	0,22	0,21

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor
Const.	-19,27	-33,64	-4,91	-2,64	0,0087
$E_d$ (MPa)	4,30E-03	3,40E-03	0,01	9,52	<0,0001
$\rho$ test [Kg/m <sup>3</sup> ]	0,05	0,02	0,08	3,1	0,002

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	28548,93	2	14274,47	61,75	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	20968,2	1	20968,2	90,71	<0,0001
ρ <sub>test</sub> [Kg/m <sup>3</sup> ]	2227,75	1	2227,75	9,64	0,002
Error	102398,11	443	231,15		
Total	130947,05	445			

De la tabla 5.10 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir, E<sub>d</sub> y ρ aportan y explican el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.10 en la sección “Coeficientes de regresión y estadísticos asociados” se desprende la siguiente ecuación que se ajusta de manera lineal:

$$y = 0,0043x_1 + 0,05x_2 - 19,27$$

Donde,

X<sub>1</sub> : Variable dependiente de E<sub>d</sub> (MPa)

X<sub>2</sub> : Variable dependiente de ρ

De la tabla 5.10 en la sección “Análisis de regresión lineal” se observa que el modelo es capaz de explicar un 22% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el resto no es explicado del todo.

Para el tercer caso en donde se consideran E<sub>d</sub>\*ρ y f<sub>m</sub> se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.11.

**Tabla 5.11:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para E<sub>d</sub>\*ρ y f<sub>m</sub>.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
f <sub>v</sub> [MPa]	446	0,22	0,21

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
Const.	5,94	0,52	11,35	2,15	0,0318
$E_d*\rho$	8,40E-06	6,90E-06	9,90E-06	11,07	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

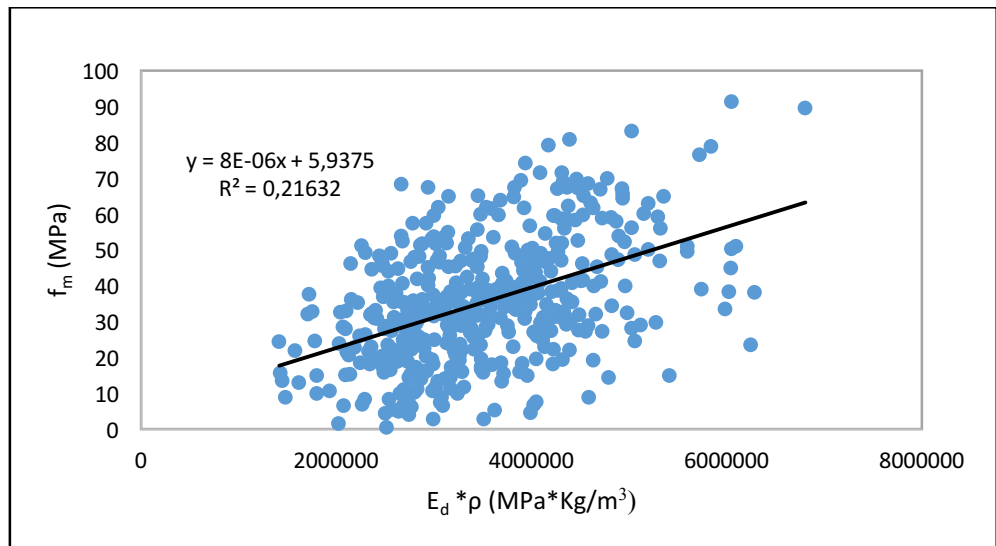
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	28326,2	1	28326,2	122,56	<0,0001
$E_d*\rho$	28326,2	1	28326,2	122,56	<0,0001
Error	102620,85	444	231,13		
Total	130947,05	445			

De la tabla 5.11 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d*\rho$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.11 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.14 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 8,40E-06x + 5,94$$

De la tabla 5.11 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.14 se observa que el modelo es capaz de explicar un 21,63% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.14:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a flexión ( $f_m$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

### 5.5. MODELO DE CORRELACIÓN DE $f_{(c, 0)}$ , $\rho$ Y $E_d$

De los resultados obtenidos de  $f_{(c, 0)}$ , y de  $E_d$  para todo el universo de muestras, además de la densidad, se obtuvieron tres modelos, en el primero se considera el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a compresión ( $f_{(c, 0)}$ ), en el segundo modelo se utiliza la densidad ( $\rho$ ), el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{(c, 0)}$ ), el tercer modelo es considerando la multiplicación del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la densidad ( $\rho$ ) como una sola variable y resistencia a compresión ( $f_{(c, 0)}$ ).

A continuación se presentan los valores que fueron obtenidos directamente del software de procesamiento estadístico *InfoStat*, el cual mediante un análisis de varianza ANOVA, otorgó la información necesaria para probar la hipótesis de que el módulo de elasticidad dinámica y la densidad responden al modelo de relación lineal. Este análisis lo que hace es dividir la variación total de las observaciones en fuentes de variación, estas fuentes son el modelo en sí y la residual debida al error

experimental. A través de la comparación de la variación debida a la hipótesis con la residual, se puede decidir acerca de la hipótesis. Si la variación es mayormente provocada por la hipótesis, entonces la hipótesis es cierta.

En los tres casos descritos anteriormente la resistencia a compresión ( $f_{(c, 0)}$ ) es considerada la variable dependiente.

Para el primer caso en donde se consideran  $E_d$  y  $f_{(c, 0)}$ , se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.12.

**Tabla 5.12:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$  y  $f_{(c, 0)}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_{(c, 0)}$ (MPa)	467	0,41	0,41

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	5,3666	3,47	7,27	5,55	<0,0001
$E_d$ (MPa)	2,00E-03	1,80E-03	2,30E-03	18,1	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

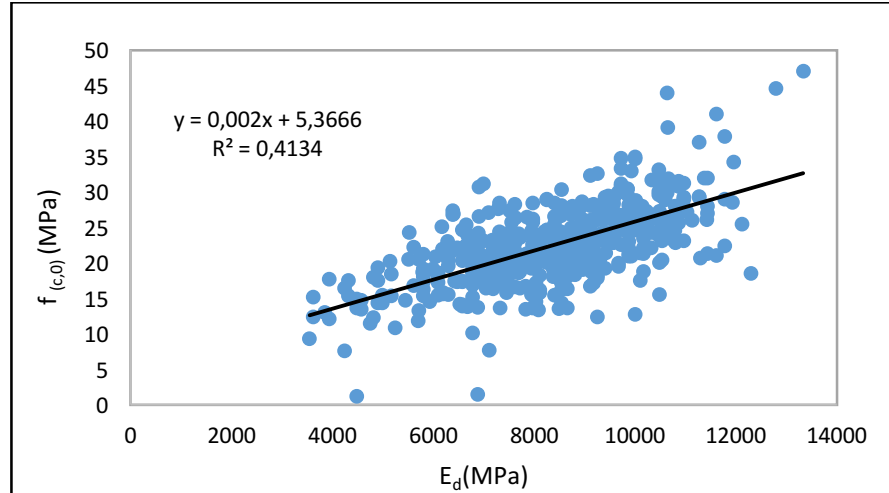
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	6229,29	1	6229,29	327,71	<0,0001
$E_d$ (MPa)	6229,29	1	6229,29	327,71	<0,0001
Error	8839,07	465	19,01		
Total	15068,36	466			

De la tabla 5.12 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.12 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.15 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 0,002x + 5,3666$$

De la tabla 5.12 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.15 se observa que el modelo es capaz de explicar un 41,34% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.15:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{c,0}$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

Para el segundo caso en donde se consideran  $E_d$ ,  $\rho$  y  $E_f$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.13.

**Tabla 5.13:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_{c,0}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$f_{c,0}$ (MPa)	467	0,47	0,47

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	-6,02	-9,59	-2,45	-3,31	0,001
$E_d$ (MPa)	1,90E-03	1,70E-03	2,10E-03	17,51	<0,0001
$\rho_{test}$ ( $Kg/m^3$ )	0,03	0,02	0,03	7,26	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	7130,92	2	3565,46	208,43	<0,0001
$E_d$ (MPa)	5246,8	1	5246,8	306,71	<0,0001
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	901,63	1	901,63	52,71	<0,0001
Error	7937,44	464	17,11		
Total	15068,36	466			

De la tabla 5.13 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d$  y  $\rho$  aportan y explican el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.13 en la sección “Coeficientes de regresión y estadísticos asociados” se desprende la siguiente ecuación que se ajusta de manera lineal:

$$y = 0,0019x_1 + 0,03x_2 - 6,02$$

Donde,

$X_1$  : Variable dependiente de  $E_d$  (MPa)

$X_2$  : Variable dependiente de  $\rho$

De la tabla 5.13 en la sección “Análisis de regresión lineal” se observa que el modelo es capaz de explicar un 47% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.

Para el tercer caso en donde se consideran  $E_d \cdot \rho$  y  $f_{c,0}$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.14.

**Tabla 5.14:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d \cdot \rho$  y  $f_{c,0}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$f_{c,0}$ (MPa)	467	0,48	0,48

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	7,58	6,12	9,05	10,15	<0,0001
$E_d \cdot \rho$	3,90E-06	3,50E-06	4,20E-06	20,64	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

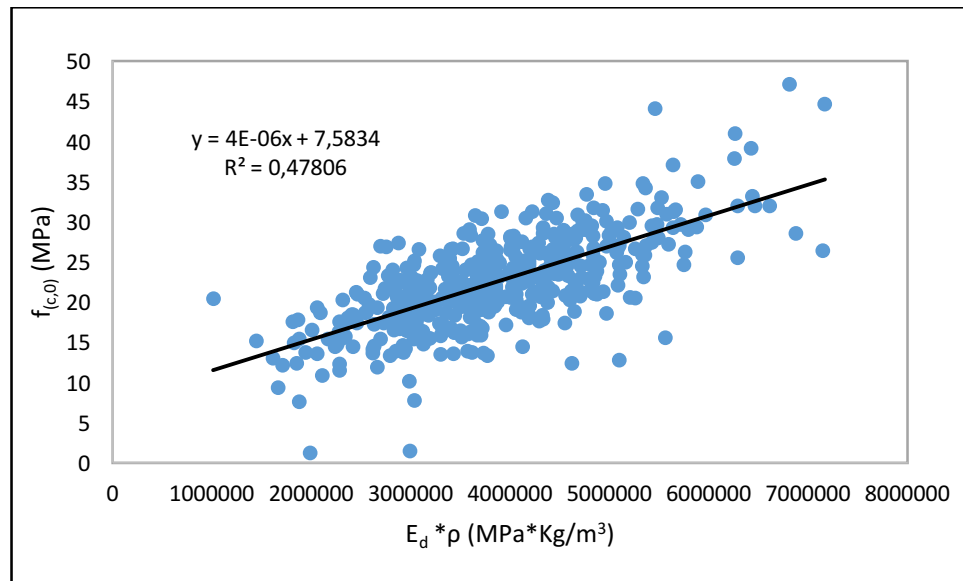
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	7203,6	1	7203,6	425,91	<0,0001
$E_d \cdot \rho$	7203,6	1	7203,6	425,91	<0,0001
Error	7864,76	465	16,91		
Total	15068,36	466			

De la tabla 5.14 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d \cdot \rho$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.14 en la sección “Coeficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.16 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 3,90E-06x + 7,58$$

De la tabla 5.14 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.16 se observa que el modelo es capaz de explicar un 48% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.16:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{c,0}$ ).  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016

### 5.6. MODELO DE CORRELACIÓN DE $f_v$ , $\rho$ Y $E_d$

De los resultados obtenidos de  $f_v$  y de  $E_d$  para todo el universo de muestras, además de la densidad, se obtuvieron tres modelos, en el primero se considera el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a compresión ( $f_v$ ), en el segundo modelo se utiliza la densidad ( $\rho$ ), el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia al cizalle ( $f_v$ ), el tercer modelo es considerando la multiplicación del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la densidad ( $\rho$ ) como una sola variable y resistencia al cizalle ( $f_v$ ).

A continuación se presentan los valores que fueron obtenidos directamente del software de procesamiento estadístico *InfoStat*, el cual mediante un análisis de varianza ANOVA, otorgó la información necesaria para probar la hipótesis de que el módulo de elasticidad dinámica y la densidad responden al modelo de relación lineal. Este análisis lo que hace es dividir la variación total de las observaciones en fuentes

de variación, estas fuentes son el modelo en sí y la residual debida al error experimental. A través de la comparación de la variación debida a la hipótesis con la residual, se puede decidir acerca de la hipótesis. Si la variación es mayormente provocada por la hipótesis, entonces la hipótesis es cierta.

En los tres casos descritos anteriormente la resistencia a compresión ( $f_v$ ) es considerada la variable dependiente.

Para el primer caso en donde se consideran  $E_d$  y  $f_v$ , se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.15.

**Tabla 5.15:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$  y  $f_v$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_v$ (MPa)	466	0,278	0,278

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	1,3689	0,84	2,01	4,78	<0,0001
$E_d$ (MPa)	5,0E-04	4,00E-04	5,40E-04	13,13	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

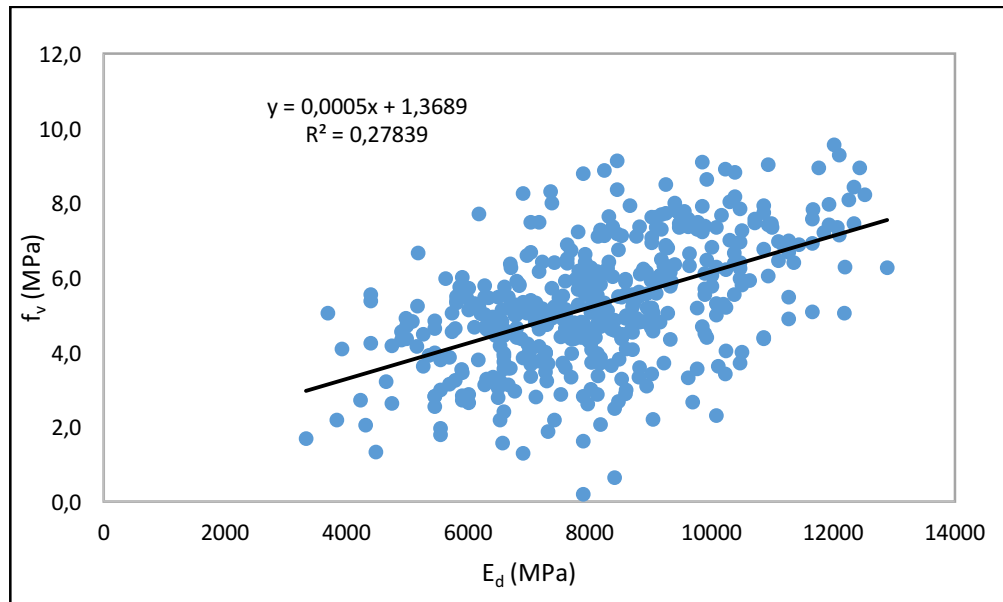
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	340,25	1	340,25	172,43	<0,0001
$E_d$ (MPa)	340,25	1	340,25	172,43	<0,0001
Error	915,59	464	1,97		
Total	1255,84	465			

De la tabla 5.15 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.15 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.17 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 5,0E-04x + 1,3689$$

De la tabla 5.15 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.17 se observa que el modelo es capaz de explicar un 27,8% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.17:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia al cizalle ( $f_v$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

Para el segundo caso en donde se consideran  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_v$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.16.

**Tabla 5.16:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_v$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$f_v$ (MPa)	466	0,45	0,45

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	-3,47	-4,4	-2,54	-7,33	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	3,10E-04	2,40E-04	3,70E-04	9,12	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,01	0,01	0,02	12,35	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	567,19	2	283,59	190,67	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	123,59	1	123,59	83,09	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	226,94	1	226,94	152,58	<0,0001
Error	688,65	463	1,49		
Total	1255,84	465			

De la tabla 5.16 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir, E<sub>d</sub> y ρ aportan y explican el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.16 en la sección “Coeficientes de regresión y estadísticos asociados” se desprende la siguiente ecuación que se ajusta de manera lineal:

$$y = 0,00031x_1 + 0,01x_2 - 3,47$$

Donde,

X<sub>1</sub>: Variable dependiente de E<sub>d</sub> (MPa)

X<sub>2</sub>: Variable dependiente de ρ

De la tabla 5.16 en la sección “Análisis de regresión lineal” se observa que el modelo es capaz de explicar un 45% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el resto no es explicado del todo.

Para el tercer caso en donde se consideran E<sub>d</sub>\*ρ y f<sub>v</sub> se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.17.

**Tabla 5.17:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d*\rho$  y  $f_v$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_v$ [MPa]	466	0,42	0,42

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	1,647	0,2	1,26	2,07	8,16	<0,0001
$E_d*\rho$	9,20E-07	5,00E-08	8,20E-07	1,00E-06	18,29	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

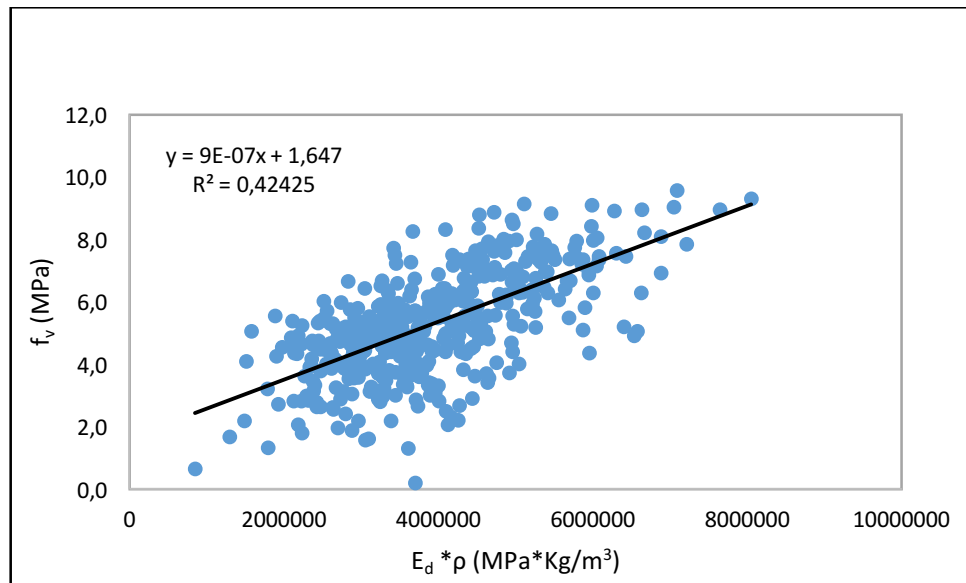
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	525,97	1	525,97	334,38	<0,0001
$E_d*\rho$	525,97	1	525,97	334,38	<0,0001
Error	729,86	464	1,57		
Total	1255,84	465			

De la tabla 5.17 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d*\rho$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.17 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.18 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 9E-07x + 1,647$$

De la tabla 5.17 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.18 se observa que el modelo es capaz de explicar un 42% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.18:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_v$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

### 5.7. MODELO DE CORRELACIÓN DE $f_{(t,0)}$ , $\rho$ Y $E_d$

De los resultados obtenidos de  $f_{(t,0)}$ , y de  $E_d$  para todo el universo de muestras, además de la densidad, se obtuvieron tres modelos, en el primero se considera el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la tracción  $f_{(t,0)}$ , en el segundo modelo se utiliza la densidad ( $\rho$ ), el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a la tracción  $f_{(t,0)}$ , el tercer modelo es considerando la multiplicación del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la densidad ( $\rho$ ) como una sola variable y resistencia a la tracción  $f_{(t,0)}$ .

A continuación se presentan los valores que fueron obtenidos directamente del software de procesamiento estadístico *InfoStat*, el cual mediante un análisis de varianza ANOVA, otorgó la información necesaria para probar la hipótesis de que el módulo de elasticidad dinámica y la densidad responden al modelo de relación lineal. Este análisis lo que hace es dividir la variación total de las observaciones en fuentes

de variación, estas fuentes son el modelo en sí y la residual debida al error experimental. A través de la comparación de la variación debida a la hipótesis con la residual, se puede decidir acerca de la hipótesis. Si la variación es mayormente provocada por la hipótesis, entonces la hipótesis es cierta.

En los tres casos descritos anteriormente la resistencia a la tracción  $f_{(t,0)}$  es considerada la variable dependiente.

Para el primer caso en donde se consideran  $E_d$  y  $f_{(t,0)}$ , se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.18.

**Tabla 5.18:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$  y  $f_{(t,0)}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_{t,0}$ (MPa)	447	0,38	0,38

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI(95%)	LS(95%)	T	Valor P
Const.	-14,23	-18,42	-10,03	-6,67	<0,0001
$E_d$ (MPa)	4,00E-03	3,50E-03	4,50E-03	16,4	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

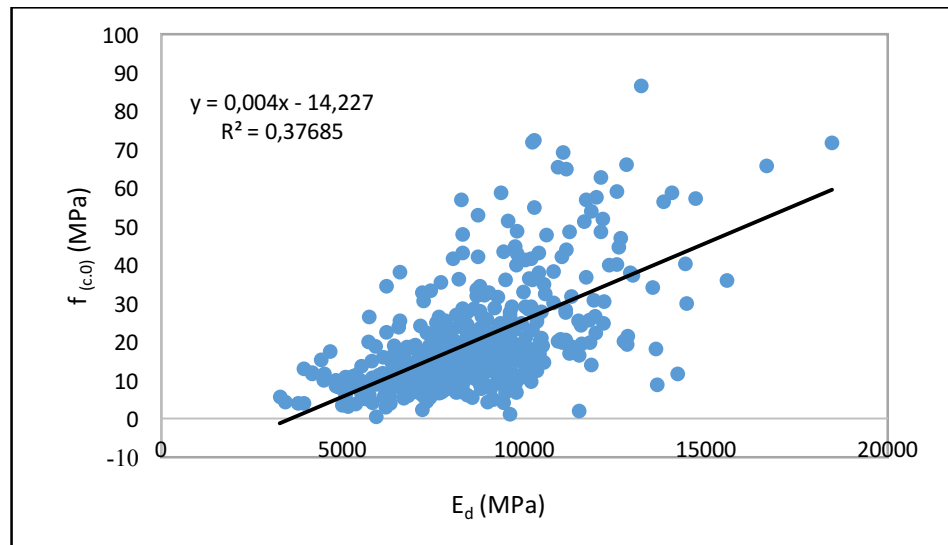
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	33856,11	1	33856,11	269,11	<0,0001
$E_d$ (MPa)	33856,11	1	33856,11	269,11	<0,0001
Error	55984,3	445	125,81		
Total	89840,41	446			

De la tabla 5.18 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.18 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.19 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 4,00E-03x + 14,227$$

De la tabla 5.18 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.19 se observa que el modelo es capaz de explicar un 38% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.19:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y la resistencia a la tracción ( $f_{(c,0)}$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

Para el segundo caso en donde se consideran  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_v$  se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.19.

**Tabla 5.19:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d$ ,  $\rho$  y  $f_{(t,0)}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	$R^2$	$R^2$ Aj
$f_{t,0}$ (MPa)	447	0,38	0,38

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	-23,19	-33,66	-12,73	-4,35	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	3,90E-03	3,40E-03	4,40E-03	15,29	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,02	-1,50E-03	0,04	1,84	0,067

Cuadro de Análisis de la Varianza

F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	34278,02	2	17139,01	136,96	<0,0001
E <sub>d</sub> (MPa)	29255,42	1	29255,42	233,78	<0,0001
ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	421,9	1	421,9	3,37	0,067
Error	55562,39	444	125,14		
Total	89840,41	446			

De la tabla 5.19 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir, E<sub>d</sub> y ρ aportan y explican el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.19 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” se desprende la siguiente ecuación que se ajusta de manera lineal:

$$y = 0,0039x_1 + 0,02x_2 - 23,19$$

Donde,

X<sub>1</sub>: Variable dependiente de E<sub>d</sub> (MPa)

X<sub>2</sub>: Variable dependiente de ρ

De la tabla 5.19 en la sección “Análisis de regresión lineal” se observa que el modelo es capaz de explicar un 38% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el resto no es explicado del todo.

Para el tercer caso en donde se consideran E<sub>d</sub>\*ρ y f<sub>v</sub> se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.20.

**Tabla 5.20:** Resultados obtenidos a partir del análisis ANOVA para  $E_d*\rho$  y  $f_{(t,0)}$ .

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj
$f_{t,0}$ (MPa)	447	0,36	0,36

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef.	Est.	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor P
Const.	-7,6599	-11,2	-4,12	-4,25	<0,0001
$E_d*\rho$	7E-06	6,00E-06	7,70E-06	15,87	<0,0001

Cuadro de Análisis de la Varianza

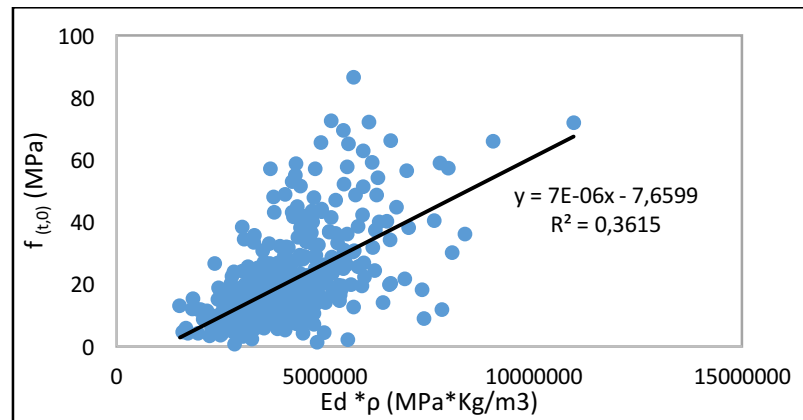
F.V.	SC	gl	CM	F	Valor P
Modelo.	32477,31	1	32477,31	251,95	<0,0001
$E_d*\rho$	32477,31	1	32477,31	251,95	<0,0001
Error	57363,1	445	128,91		
Total	89840,41	446			

De la tabla 5.20 en la sección “Cuadro de Análisis de la Varianza” es importante destacar que a un nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula, es decir,  $E_d*\rho$  aporta y explica el modelo como variable única independiente.

De la tabla 5.20 en la sección “Coefficientes de regresión y estadísticos asociados” en conjunto con la figura 5.20 se observa de manera clara que los datos siguen una tendencia lineal, la que se ajusta a la ecuación:

$$y = 7E-06x - 7,6599$$

De la tabla 5.20 en la sección “Análisis de regresión lineal” en conjunto con la figura 5.20 se observa que el modelo es capaz de explicar un 36% de los datos, según lo indica el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el resto no es explicado del todo.



**Figura 5.20:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) por la densidad ( $\rho$ ) y la resistencia a compresión ( $f_{(c,0)}$ ).  
**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

#### 5.8. ELECCIÓN DEL MODELO

Para los modelos presentados anteriormente, en los cuales se utilizan tres casos, se obtienen diversos coeficientes de correlación ( $R^2$ ) y coeficientes de correlación ajustados ( $R^2$  Aj), los cuales se presentan en la tabla 5.21.

**Tabla 5.21:** Coeficientes de correlación.

Propiedades	Modelo	$R^2$	$R^2$ Aj
$E_f, E_d$ y $\rho$	Caso 1	0,69	0,69
	Caso 2	0,75	0,74
	Caso 3	0,74	0,74
$f_m, E_d$ y $\rho$	Caso 1	0,21	0,21
	Caso 2	0,22	0,21
	Caso 3	0,22	0,21
$f_{(c,0)}, E_d$ y $\rho$	Caso 1	0,41	0,41
	Caso 2	0,47	0,47
	Caso 3	0,48	0,48
$f_v, E_d$ y $\rho$	Caso 1	0,28	0,28
	Caso 2	0,45	0,45
	Caso 3	0,42	0,42

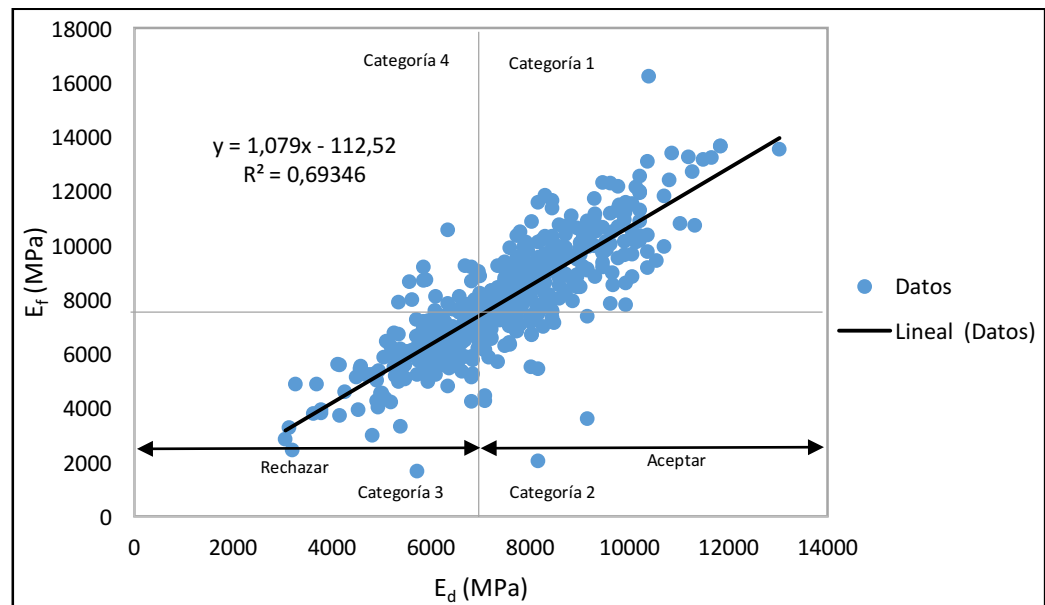
$f_{(t,0)}$ , $E_d$ y $\rho$	Caso 1	0,38	0,38
	Caso 2	0,38	0,38
	Caso 3	0,36	0,36

Para determinar qué modelo utilizar, hay que observar los distintos coeficientes de correlación obtenidos (ver Tabla 5.21), y es por este mismo coeficiente que se decide utilizar el caso 1, dado que los coeficientes de correlación entre el modelo simple y los otros dos, no difieren en gran manera, por lo que para la sección 5.16 hasta la sección 5.20 del capítulo 5, se utilizó el modelo o caso 1.

## 5.9. GRADOS ESTRUCTURALES

### 5.9.1. GRADO ESTRUCTURAL PARA $E_f$ A PARTIR DEL $E_d$

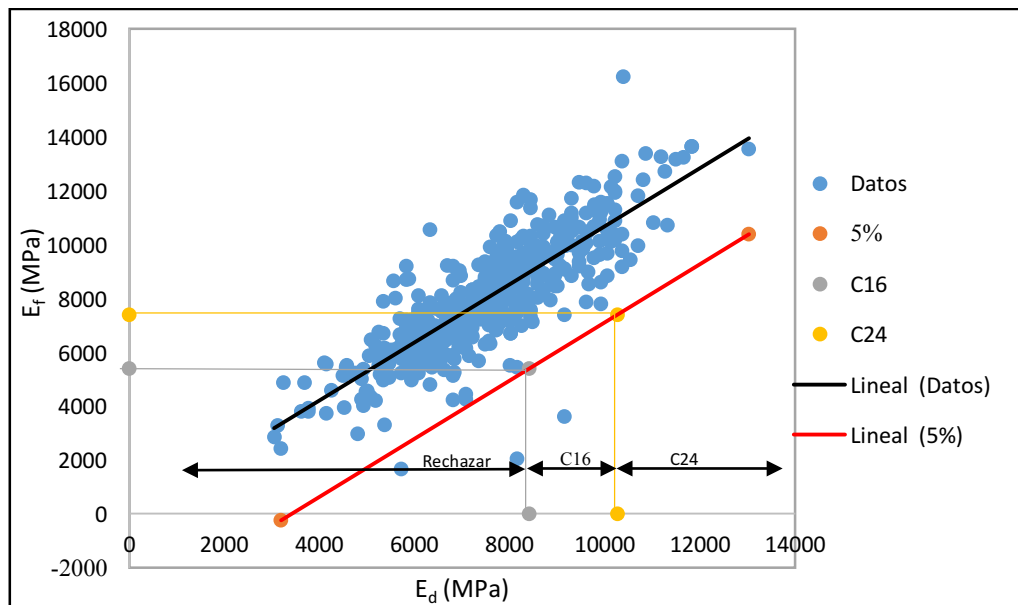
De los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y módulo de elasticidad a flexión estática  $E_f$ , el modelo de regresión lineal se presenta en la figura 5.22.



**Figura 5.21:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y módulo de elasticidad a flexión estática ( $E_f$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

En la figura 5.22 se observan las cuatro categorías mencionadas en la sección 4.8.2 del capítulo 4 de este estudio, donde el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico está dado por el promedio de este parámetro, que es 7469 MPa. Por otro lado, el límite que se establece en el eje del módulo de elasticidad a flexión estática, está dado por el promedio de este parámetro, que es 7946 MPa. Sin embargo, esta distribución de categorías con esta línea de tendencia para determinar grados estructurales lleva a errores, tal como se mencionó en la metodología sección 4.8.2, por lo tanto, se traza una nueva línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 del módulo de elasticidad a flexión estática, como se muestra en la figura 5.23.



**Figura 5.22:** Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y módulo de elasticidad a flexión estática.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

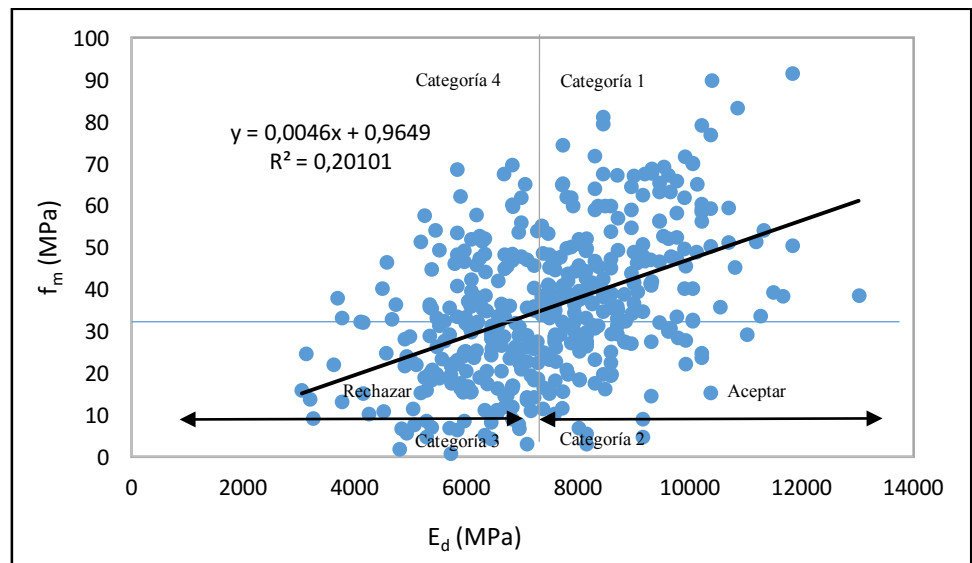
En la figura 5.23 se observan los rangos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales C16 y C24, para el módulo de elasticidad en flexión estática, además del respectivo rechazo, estos rangos se muestran en la tabla 5.22.

**Tabla 5.22:** Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando el módulo de elasticidad a flexión estática.

Grado estructural	$E_f$ (MPa)	Límite Inferior $E_d$ (MPa)	Límite Superior $E_d$ (MPa)
Rechazo	-----	----	<8411
C16	5400	$\geq 8411$	< 10265
C24	7400	$\geq 10265$	----

### 5.9.2. GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_m$ A PARTIR DEL $E_d$

De los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y resistencia a la flexión  $f_m$ , el modelo de regresión lineal se presenta en la figura 5.24.

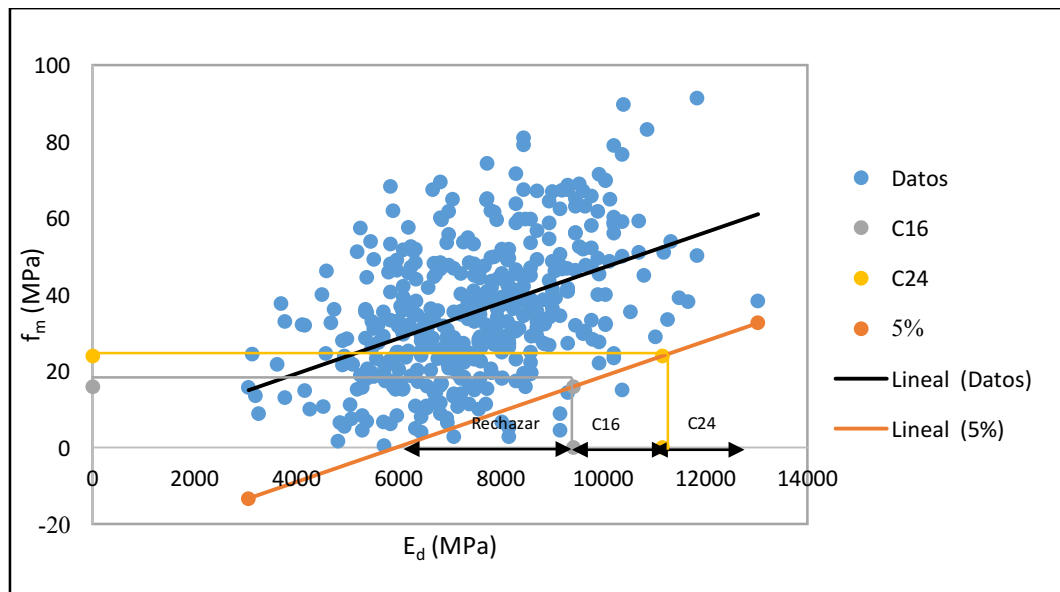


**Figura 5.23:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a flexión ( $f_m$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

En la figura 5.24 se observan las cuatro categorías mencionadas en la sección 4.8.2 del capítulo 4 de este estudio, donde el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico está dado por el promedio de este parámetro, que es 7484 MPa. Por otro lado, el límite que se establece en el eje de la resistencia a la flexión, está dado por el promedio de este parámetro, que es 35,4 MPa. Sin embargo, esta distribución de categorías con esta línea de tendencia para determinar grados

estructurales lleva a errores, tal como se mencionó en la metodología sección 4.82, por lo tanto, se traza una nueva línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 de la resistencia a la flexión, como se muestra en la figura 5.25.



**Figura 5.24:** Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a flexión.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

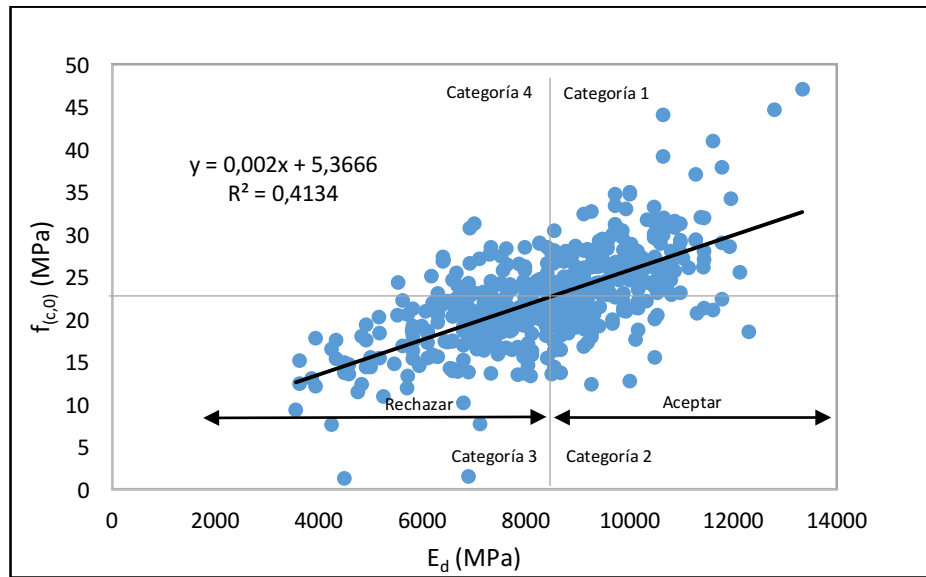
En la figura 5.25 se observan los rangos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales C16 y C24, para la resistencia a flexión, además del respectivo rechazo, estos rangos se muestran en la tabla 5.23.

**Tabla 5.23:** Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la flexión.

Grado estructural	Resistencia a flexión $f_m$ (MPa)	Límite Inferior $E_d$ (MPa)	Límite Superior $E_d$ (MPa)
Rechazo	----	----	< 9415
C16	16	$\geq 9415$	< 11154
C24	24	$\geq 11154$	----

### 5.9.3. GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_{(c,0)}$ A PARTIR DEL $E_d$

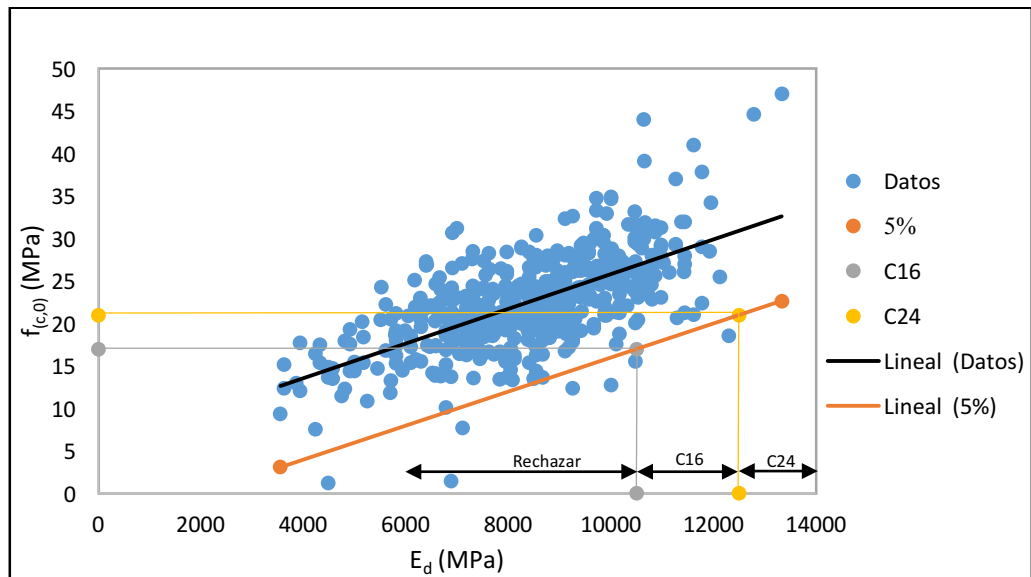
De los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y resistencia a la compresión  $f_{(c,0)}$ , el modelo de regresión lineal se presenta en la figura 5.26.



**Figura 5.25:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la compresión ( $f_{(c,0)}$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

En la figura 5.26 se observan las cuatro categorías mencionadas en la sección 4.8.2 del capítulo 4 de este estudio, donde el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico está dado por el promedio de este parámetro, que es 8374 MPa. Por otro lado, el límite que se establece en el eje de la resistencia a la compresión, está dado por el promedio de este parámetro, que es 22 MPa. Sin embargo, esta distribución de categorías con esta línea de tendencia para determinar grados estructurales lleva a errores, tal como se mencionó en la metodología sección 4.82, por lo tanto, se traza una nueva línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 de la resistencia a la compresión, como se muestra en la figura 5.27.



**Figura 5.26:** Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a compresión.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

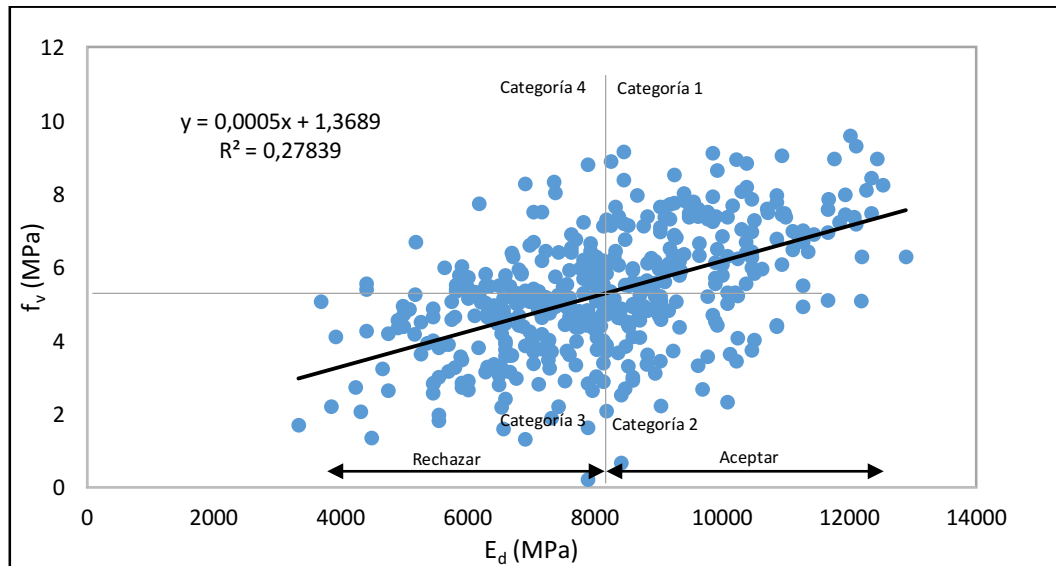
En la figura 5.27 se observan los rangos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales C16 y C24, para la resistencia a compresión, además del respectivo rechazo, estos rangos se muestran en la tabla 5.24.

**Tabla 5.24:** Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la compresión.

Grado estructural	Resistencia a compresión $f_{c,0}$ (MPa)	Límite Inferior $E_d$ (MPa)	Límite Superior $E_d$ (MPa)
Rechazo	----	----	<10503
C16	17	$\geq 10503$	< 12503
C24	21	$\geq 12503$	-----

#### 5.9.4. GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_v$ A PARTIR DEL $E_d$

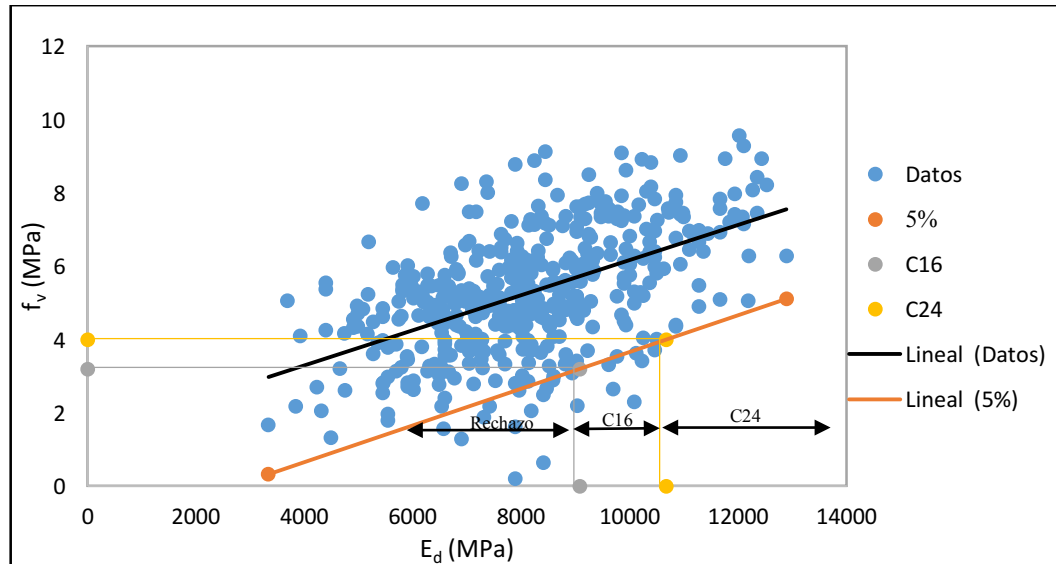
De los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y resistencia a la compresión  $f_{(c,0)}$ , el modelo de regresión lineal se presenta en la figura 5.28.



**Figura 5.27:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la cizalle ( $f_v$ )

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

En la figura 5.28 se observan las cuatro categorías mencionadas en la sección 4.8.2 del capítulo 4 de este estudio, donde el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico está dado por el promedio de este parámetro, que es 8142 MPa. Por otro lado, el límite que se establece en el eje de la resistencia al cizalle, está dado por el promedio de este parámetro, que es 5,25 MPa. Sin embargo, esta distribución de categorías con esta línea de tendencia para determinar grados estructurales lleva a errores, tal como se mencionó en la metodología sección 4.82, por lo tanto, se traza una nueva línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 de la resistencia a cizalle, como se muestra en la figura 5.29.



**Figura 5.28:** Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia al cizalle.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

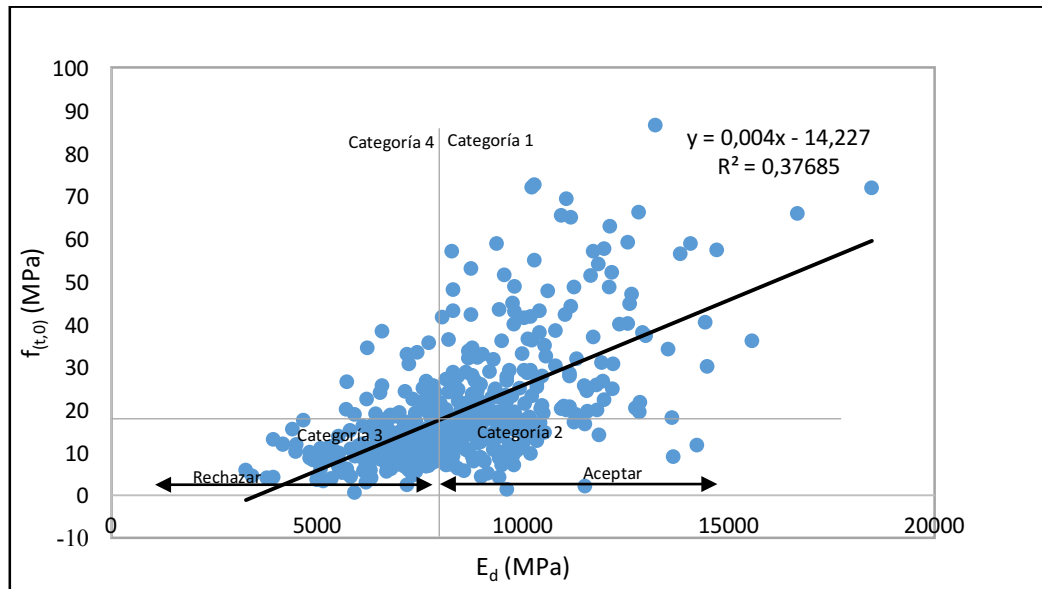
En la figura 5.29 se observan los rangos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales C16 y C24, para la resistencia al cizalle, además del respectivo rechazo, estos rangos se muestran en la tabla 5.25.

**Tabla 5.25:** Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia al cizalle.

Grado estructural	Resistencia al cizalle $f_v$ (MPa)	Límite Inferior $E_d$ (MPa)	Límite Superior $E_d$ (MPa)
Rechazo	----	----	<9079
C16	3,2	$\geq 9079$	< 10679
C24	4	$\geq 10679$	----

### 5.9.5. GRADO ESTRUCTURAL PARA $f_{(t,0)}$ A PARTIR DEL $E_d$

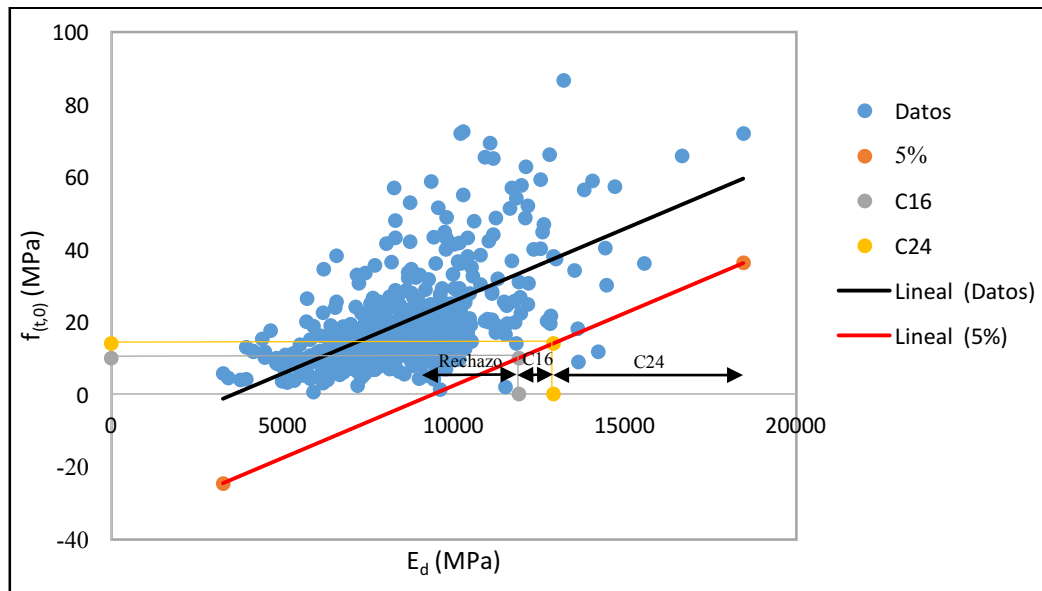
De los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y resistencia a la compresión  $f_{(c,0)}$ , el modelo de regresión lineal se presenta en la figura 5.30.



**Figura 5.29:** Correlación módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y resistencia a la tracción ( $f_{(t,0)}$ ).

**Fuente:** Elaboración propia, 2016

En la figura 5.30 se observan las cuatro categorías mencionadas en la sección 4.8.2 del capítulo 4 de este estudio, donde el límite de rechazo en el eje del módulo de elasticidad dinámico está dado por el promedio de este parámetro, que es 8484 MPa. Por otro lado, el límite que se establece en el eje de la resistencia a tracción, está dado por el promedio de este parámetro, que es 19,67 MPa. Sin embargo, esta distribución de categorías con esta línea de tendencia para determinar grados estructurales lleva a errores, tal como se mencionó en la metodología sección 4.82, por lo tanto, se traza una nueva línea de tendencia de confianza menor, la cual pasa por los datos del percentil 5 de la resistencia a la tracción, como se muestra en la figura 5.31.



**Figura 5.30:** Modelo de correlación con línea de tendencia menor entre módulo de elasticidad dinámico y resistencia a la tracción.

**Fuente:** Elaboración propia, 2016.

En la figura 5.31 se observan los rangos de módulo de elasticidad dinámico para los grados estructurales C16 y C24, para la resistencia a la tracción, además del respectivo rechazo, estos rangos se muestran en la tabla 5.26.

**Tabla 5.26:** Límite Inferior y Superior para el módulo de elasticidad dinámico, considerando la resistencia a la tracción.

Grado estructural	Resistencia a la tracción $f_{t(0)}$ (MPa)	Límite Inferior $E_d$ (MPa)	Límite Superior $E_d$ (MPa)
Rechazo	----	----	<11905
C16	10	$\geq 11905$	< 12905
C24	14	$\geq 12905$	----

## 5.10. VALORES DE CLASIFICACIÓN

Una vez determinados los rangos de valores para las distintas propiedades, se obtienen valores de clasificación tanto para el grado estructural C16 como para el C24, los cuales se presentan en la tabla 5.27

**Tabla 5.27:** Rango de valores para las distintas propiedades, para los grados estructurales C16, C24.

Grado Estructural	$E_f$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	$f_{c,0}$ (MPa)	$f_v$ (MPa)	$f_{t,0}$ (MPa)
C16	8411	9415	10503	9079	11905
C24	10265	11154	12503	10679	12905

Uno de los métodos de clasificación, es utilizar como valores de clasificación para los valores de grados estructurales C16 y C24, los valores máximos del módulo de elasticidad en flexión y la resistencia en flexión, los cuales se muestran en la tabla 5.28.

**Tabla 5.28:** Valores máximos del módulo de elasticidad en flexión y la resistencia en flexión, para los grados estructurales C16, C24.

Grado Estructural	$E_f$ (MPa)	$f_m$ (MPa)
C16	8411	9415
C24	10265	11154

**Tabla 5.29:** Valores de settings para los grados estructurales, C16 y C24 respectivamente.

Grado Estructural	$f_m$ (MPa)
C16	9415
C24	11154

**Tabla 5.30:** Cantidad de piezas para cada grado estructural y su correspondiente propiedad.

Propiedad	Grado Estructural	Cantidad de Piezas
$E_f$ (MPa)	c16	53
	c24	8
$f_m$ (MPa)	c16	53
	c24	8
$f_{(c,0)}$ (MPa)	c16	132
	c24	6
$f_v$ (MPa)	c16	107
	c24	0
$f_{(t,0)}$ (MPa)	c16	131
	c24	4

El otro método de clasificación, es utilizar como valores de clasificación para los valores de grados estructurales C16 y C24, los valores máximos de la resistencia a flexión paralela, los cuales se muestran en la tabla 5.32.

**Tabla 5.31:** Valores máximos de la resistencia a tracción paralela, para los grados estructurales C16, C24.

Grado Estructural	$f_{t,0}$ (MPa)
C16	11905
C24	12905

**Tabla 5.32:** Cantidad de piezas para cada grado estructural y su correspondiente propiedad.

Propiedad	Grado Estructural	Cantidad de Piezas
$E_f$ (MPa)	c16	0
	c24	1
$f_m$ (MPa)	c16	0
	c24	1
$f_{(c,0)}$ (MPa)	c16	6
	c24	0
$f_v$ (MPa)	c16	14
	c24	0
$f_{(t,0)}$ (MPa)	c16	32
	c24	0

Después de realizado este análisis, se determinó utilizar el primer método debido a que se cumple con la norma Chilena NCh3028/2, la cual solicita como mínimo 30 piezas que se encuentren en dicho rango.

#### 5.11. VALORES ADMISIBLES

Una vez realizados los cálculos para los valores admisibles, procedimiento que se explica en la sección 4.7 del capítulo 4, se obtienen los valores que se presentan en las tablas 5.30 y 5.32, estos valores corresponden a la cantidad de piezas para los grados estructurales C16 y C24, debido a que la norma Chilena NCh3028/2 pide como mínimo 30 piezas que se encuentren en dicho rango, y tan solo se cumple para el grado estructural C16, dado que la muestra es insuficiente para obtener valores admisibles para el grado estructural C24.

A continuación se presentan los valores admisibles para las distintas propiedades, para el grado estructural C16.

**Tabla 5.33:** Valores admisibles para las distintas propiedades, para el grado estructural C16.

$E_{f,12\% adm}$ (MPa)	10633
$f_{m,12\% adm}$ (MPa)	6,13
$f_{(c,0),12\% adm}$ (MPa)	8,82
$f_{v,12\% adm}$ (MPa)	0,87
$f_{(t,0),12\% adm}$ (MPa)	4,27

El cálculo de estos valores se muestra en los anexos A, B, C, D y E.

**Tabla 5.34:** Tensiones admisibles expresadas en MPa.

Grado estructural	Tensiones Admisibles				Módulo de elasticidad en flexión $E_f^2$
	Flexión <sup>1</sup> $F_f$	Compresión paralela $F_{cp}$	Tracción paralela <sup>1</sup> $F_{tp}$	Cizalle $F_{cz}$	
C24	9,3	8,0	4,7	1,1	10.200
C16	5,2	7,5	3,5	1,1	7.900

1. Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal 90 mm.
2. Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal  $\geq 180$  mm. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%,  $E_{fk}$ , se puede estimar como  $0.60 E_f$ .

Si se hace la comparación entre la tabla 5.33 y la 5.34, se observa que para el grado estructural C16 cumplen todas las propiedades excepto la resistencia a cizalle paralelo, sin embargo, en INFOR se realizó un estudio (IT N°209, INFOR, 2016), para modificar los valores admisibles en la nueva versión de la NCh 1198, en donde se hace referencia principalmente a la disminución de estos y en donde el valor de la resistencia a cizalle paralelo disminuirá a 0.6 MPa, de esta forma se aceptan los valores admisibles obtenidos en este estudio, para el grado estructural C16.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Se determinó que el instrumento de medición Timber Grader MTG, es una herramienta que a través de la densidad, escuadría, contenido de humedad y la frecuencia natural, otorga buenas aproximaciones de módulo de elasticidad estático a partir del módulo de elasticidad dinámico para la especie *Pinus Radiata*.

Una vez realizadas las correlaciones correspondientes y determinados los rangos donde se encuentra un grado estructural C16, C24 o un rechazo, se obtuvieron los valores admisibles para los diferentes ensayos, estos valores fueron obtenidos mediante un análisis al quinto percentil. Para este estudio en particular la cantidad de piezas que se encontraban en el rango del grado estructural C24 no cumplen con la norma NCh 3028/2, esto se debe principalmente a que la muestra no fue lo suficientemente grande para cumplir con este requisito.

Sin embargo, los criterios de clasificación para el grado estructural C16 cumplen con los valores admisibles requeridos para el grado.

## CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Instituto Nacional de Normalización (INN), 2006.** NCh 3028/1: Madera estructural – Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia – Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural.

**Instituto Nacional de Normalización (INN), 2008.** NCh 3028/2: 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 en tamaño estructural.

**Instituto Nacional de Normalización (INN), 1988.** NCh 176/2 Of. 86: Determinación de la densidad.

**Instituto Nacional de Normalización (INN), 2003.** NCh 2827 Of. 2003: Calibración y uso de xilohigrómetros portátiles.

**Instituto Nacional de Normalización (INN), 1984.** NCh 176/1 Of. 1984: Madera – Parte 1: Determinación de la humedad.

**Gonzales, M. 2013.** Bases de un sistema de certificación de madera para uso estructural en Chile. Tesis Magíster. Universidad del Bio-Bio.

**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. Tesis de pregrado. Universidad Católica de la Santísima Concepción.

**Pérez, V. 1983.** Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. Santiago, Chile. Corporación Nacional Forestal. 451 p.

**Torres, H. 1971.** Maderas. Santiago, Chile. Corporación Chilena de la Madera. 263 p.

**Cuevas, E. 2003.** Propiedades físicas y mecánicas de la madera. Material de apoyo en propiedades físicas y mecánicas. Talca, Chile. Universidad de Talca, Escuela de Ingeniería en Industrias de la Madera. 68 p. (No Publicado).

**Karsulovic, J. 1982.** Propiedades mecánicas de la madera. Santiago, Chile. Editorial Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales, departamento de Tecnología de la Madera. 101 p.

**Green, D., Kretschmann, D. 1999.** Chapter 4: Mechanical Properties of Wood. Wood handbook – Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory; USDA Forest Service; Madison, Wisconsin. 4-1, 4-3 p.

**Veliz, G. 2003.** Determinación de propiedades físicas y mecánicas en maderas de híbridos de Populus (I-488, I-63/51). Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de ciencias Forestales. 66 p

## CAPITULO 8: ANEXOS

Anexo A: Cálculo valor admisible para módulo de elasticidad estática a flexión.

Code	ptest [Kg/m3]	Ed (MPa)	Ef (MPa)	CH Horno	Ef,12%	Ef,a
S022FE01P003	655	10386	16213	16,73	15057	15057
S022FE01P018	528	10131	12149	16,38	11348	11348
S022FE02P002	471	9918	11580	12,57	11481	11481
S022FE02P019	487	9451	10646	12,18	10617	10617
S022FE02P026	549	9606	10052	11,88	10071	10070
S022FE02P032	436	10203	10352	11,22	10474	10474
S022FE02P038	463	10851	13382	10,38	13709	13709
S022FE02P040	552	10364	13090	7,60	13958	13958
S022FE02P045	480	9451	9707	10,42	9938	9938
S022FE02P048	463	10203	11282	10,09	11607	11607
S022FE02P053	475	9451	9370	10,55	9575	9575
S022FE02P055	444	10044	11518	10,84	11719	11719
S022FE02P063	495	10688	9954	10,74	10143	10143
S022FE02P067	464	11017	10805	10,87	10988	10988
S022FE02P071	465	10364	9174	11,59	9231	9230
S022FE02P074	507	9761	11335	12,36	11274	11274
S022FE02P080	494	10044	10527	11,55	10598	10598
S022FE02P082	501	10364	9756	11,17	9878	9878
S022FE02P083	456	9606	7860	10,51	8037	8037
S022FE02P095	505	10203	11921	10,07	12267	12267
S022FE02P102	532	9451	12316	10,04	12679	12679
S022FE02P107	499	9761	10670	11,48	10754	10754
S022FE02P110	522	10364	10381	10,62	10597	10597
S022FE02P118	442	9918	8601	10,95	8737	8737
S022FE02P120	435	9761	9514	10,71	9699	9699
S022FE02P123	522	10203	11969	12,05	11960	11960
S022FE02P127	464	10044	8835	11,61	8886	8886
S022FE02P129	495	10044	9665	12,55	9585	9585
S022FE02P137	458	9451	9197	10,96	9341	9341
S022FE02P143	513	9606	12279	14,70	11780	11780
S022FE02P145	495	10203	10178	11,92	10190	10190
S022FE02P149	612	10203	10888	19,14	9717	9716
S022FE02P161	572	10203	12532	11,40	12646	12646
S022FE02P162	443	9606	11177	11,47	11266	11266
S022FE02P164	452	9918	7802	11,02	7917	7917
S022FE02P167	505	9761	11278	10,90	11465	11464
S022FE02P168	500	9761	12164	11,11	12327	12327
S022FE02P170	476	10044	11495	10,44	11765	11765
S022FE02P173	570	10688	11819	12,62	11708	11708
S022FE02P184	424	9451	9764	12,47	9695	9695
S022FE03P036	513	9784	11485	13,65	11199	11199
S022FE03P061	435	9911	11190	13,97	10857	10857
S022FE03P062	454	9532	9841	12,72	9734	9734
S022FE03P076	560	10798	12399	15,49	11746	11746
S022FE03P112	419	10534	9441	0,00	11148	11148
S022FE03P116	432	9657	8542	14,36	8237	8237
S022FE04P003	432	9643	8983	17,68	8214	8214
S022FE04P010	468	9892	10135	16,73	9413	9413
S022FE04P049	470	9521	10131	16,54	9439	9439
S022FE04P051	469	9892	10937	16,42	10208	10208
S022FE04P078	565	9892	9631	15,16	9173	9172
S022FE04P079	476	10119	10104	15,59	9558	9558
S022FE04P080	539	9643	10487	15,60	9918	9918
PROMEDIO	492	9988	10689	12,3	10633	10633

Anexo B: Cálculo valor admisible de resistencia a flexión paralela.

Code	p <sub>test</sub> [Kg/m <sup>3</sup> ]	E <sub>d</sub> (MPa)	f <sub>m</sub> (MPa)	CH	f <sub>m</sub> (MPa)
S022FE02P110	522,3	10364	15	11	15,1
S022FE02P118	442,5	9918	22	11	21,9
S022FE02P145	495,5	10203	25	12	24,6
S022FE02P149	612,0	10203	24	19	25,9
S022FE02P164	451,6	9918	28	11	27,3
S022FE02P067	464,4	11017	29	11	28,6
S022FE03P036	513,4	9784	28,2	14	29,0
S022FE02P083	455,7	9606	30	11	29,2
S022FE02P026	549,0	9606	30	12	29,8
S022FE03P112	419,2	10534	35,5	0	29,9
S022FE02P053	474,7	9451	32	11	31,2
S022FE02P127	463,5	10044	32	12	32,0
S022FE02P120	434,6	9761	33	11	32,5
S022FE02P129	495,4	10044	32	13	32,8
S022FE04P003	431,6	9643	30	18	34,0
S022FE02P080	493,8	10044	40	12	39,6
S022FE04P051	468,6	9892	40	16	44,4
S022FE02P002	470,7	9918	45	13	46,0
S022FE02P168	500,3	9761	47	11	46,3
S022FE02P184	423,5	9451	46	12	46,9
S022FE03P076	559,7	10798	45,0	15	49,1
S022FE02P082	501,1	10364	50	11	49,1
S022FE03P116	432,4	9657	47,7	14	50,6
S022FE02P162	442,5	9606	52	11	51,3
S022FE02P173	570,3	10688	51	13	51,8
S022FE02P074	507,5	9761	52	12	52,7
S022FE04P079	476,5	10119	49	16	53,5
S022FE02P102	531,9	9451	56	10	53,7
S022FE04P078	565,4	9892	50	15	53,7
S022FE02P137	458,5	9451	56	11	54,7
S022FE02P123	521,7	10203	56	12	56,1
S022FE02P048	462,8	10203	59	10	56,2
S022FE02P032	435,8	10203	58	11	57,2
S022FE02P107	498,8	9761	58	11	57,3
S022FE02P063	495,3	10688	59	11	57,4
S022FE02P095	504,8	10203	60	10	57,4
S022FE02P071	464,5	10364	59	12	58,5
S022FE04P049	470,0	9521	53	17	59,6
S022FE02P045	479,6	9451	65	10	62,5
S022FE02P019	487,2	9451	63	12	63,4
S022FE02P167	505,0	9761	66	11	63,9
S022FE02P170	475,7	10044	70	10	67,1
S022FE02P055	444,2	10044	70	11	67,7
S022FE02P040	551,7	10364	77	8	68,5
S022FE04P080	538,9	9643	63	16	69,9
S022FE03P062	453,5	9532	69,0	13	70,4
S022FE04P010	468,3	9892	62	17	70,9
S022FE02P143	512,7	9606	67	15	72,4
S022FE01P018	528,5	10131	64,9	16	73,9
S022FE03P061	435,0	9911	71,5	14	75,7
S022FE02P161	572,0	10203	79	11	77,6
S022FE02P038	462,8	10851	83	10	79,5
S022FE01P003	655,1	10386	89,7	17	104,5

DATOS	53
POSICIÓN	2,7
EPN	12,9
FACTOR DE CORRECCIÓN	1/2,1
f <sub>m,12% adm</sub> (MPa)	6,1

Anexo C: Cálculo valor admisible de resistencia a compresión paralela.

Code	ptest [Kg/m3]	Ed (MPa)	f(c,0) [MPa]	CH	fc (MPa)
S017CP03P077	615,4	10464	33	99	1,6
S022CP02P011	509,9	10000	13	12	12,7
S022CP02P045	530,4	10479	16	11	15,4
S022CP02P178	403,9	12294	19	0	15,4
S022CP02P160	457,3	10158	19	0	15,5
S022CP02P156	356,0	10479	20	0	16,4
S022CP02P146	410,9	9874	21	0	17,0
S022CP02P194	417,6	11605	21	0	17,0
S022CP02P136	388,0	9874	21	0	17,2
S022CP02P179	418,2	10158	21	0	17,2
S022CP02P164	492,5	10318	22	0	17,7
S022CP02P141	410,4	11776	22	0	17,9
S017CP03P021	425,1	10102	18	14	18,2
S022CP02P169	487,0	10968	23	0	18,3
S022CP04P082	514,9	9421	23	0	18,4
S022CP02P138	418,6	10000	25	0	19,3
S022CP02P191	518,9	12121	26	0	19,9
S022CP02P137	416,0	11134	26	0	20,2
S022CP02P162	499,1	10158	26	0	20,3
S022CP02P161	447,9	10804	27	0	20,7
S022CP02P153	469,4	11436	27	0	20,9
S022CP04P068	416,7	11290	21	12	20,9
S022CP02P036	431,7	11436	21	11	21,0
S022CP04P030	433,8	9667	19	15	21,0
S022CP02P154	477,6	10479	27	0	21,1
S022CP02P004	460,1	10640	25	6	21,5
S022CP02P107	397,9	10158	22	11	21,6
S017CP03P054	455,0	9594	23	9	21,7
S017CP03P014	456,3	10102	21	13	22,1
S022CP02P168	491,7	11776	29	0	22,2
S022CP02P148	431,5	10968	29	0	22,2
S022CP02P127	390,5	9874	22	12	22,2
S022CP04P044	452,5	9667	20	16	22,5
S022CP04P070	407,3	10527	23	11	22,7
S022CP02P128	386,7	9874	23	12	22,7
S022CP02P065	446,7	10804	23	12	22,8
S022CP02P095	437,5	10158	23	11	23,0
S022CP02P017	477,9	9718	23	13	23,3
S022CP02P058	480,5	10000	25	10	23,4
S022CP02P167	434,5	9718	31	0	23,6
S022CP02P014	500,9	9563	23	13	23,6
S022CP04P028	499,7	10527	20	17	23,8
S022CP02P099	429,4	10640	24	11	24,0
S022CP02P089	419,0	10000	25	11	24,3
S022CP02P021	419,9	10479	24	12	24,3
S022CP04P045	491,4	9917	21	17	24,6
S022CP02P100	467,7	9563	25	12	24,7
S017CP03P018	475,4	10728	23	14	24,9
S017CP03P078	469,8	10335	24	13	24,9
S022CP02P074	474,9	9718	25	12	25,0
S022CP02P072	445,9	10158	25	13	25,1
S022CP02P122	444,1	10479	26	11	25,3
S022CP04P006	473,8	9544	24	14	25,6
S022CP02P034	445,4	9874	26	12	25,7
S017CP03P081	520,7	10231	24	14	26,0
S022CP04P114	532,8	10788	25	14	26,1
S022CP02P117	414,5	9718	26	12	26,2
S017CP03P083	490,8	9594	24	14	26,2
S022CP04P079	393,6	11424	26	12	26,3
S017CP03P069	416,7	10861	26	13	26,4
S022CP02P018	419,7	10000	27	12	26,6
S017CP03P020	437,6	9974	26	13	26,6
S022CP04P098	518,6	10271	26	14	27,1
S022CP02P003	452,8	10000	27	12	27,1

S022CP02P061	602,2	9563	26	13	27,2
S022CP02P029	406,1	9874	27	13	27,3
S022CP02P027	423,2	10968	28	11	27,5
S017CP03P106	456,6	10231	26	14	27,6
S022CP02P046	516,3	9874	27	13	27,7
S022CP02P104	433,3	10318	27	13	27,7
S022CP02P090	401,0	11436	28	12	27,8
S022CP02P020	489,3	9874	26	14	27,8
S017CP03P009	443,7	9974	26	14	27,8
S022CP02P056	489,6	9874	28	12	27,9
S017CP03P034	413,5	9720	27	14	28,0
S017CP03P113	509,1	9974	26	14	28,1
S022CP02P129	403,3	10000	28	12	28,3
S022CP02P015	475,7	10804	28	13	28,5
S017CP03P010	449,0	10102	27	13	28,6
S022CP02P052	478,3	9563	28	12	28,6
S022CP02P111	453,1	9563	28	12	28,6
S022CP02P019	508,0	10804	28	13	28,7
S017CP03P007	418,8	10231	27	14	28,7
S017CP03P024	524,3	9469	27	14	28,8
S022CP04P054	534,9	10144	27	14	28,9
S022CP04P026	520,2	9792	25	17	29,4
S022CP02P035	513,9	10968	29	12	29,4
S022CP04P004	459,3	10144	28	14	29,5
S017CP03P008	451,3	10595	29	13	30,0
S022CP02P084	488,8	10640	30	12	30,2
S017CP03P035	422,2	9846	30	12	30,2
S022CP04P073	488,9	9667	30	12	30,3
S017CP03P109	488,3	9469	28	14	30,3
S017CP03P047	474,8	10464	30	12	30,5
S017CP03P026	509,0	9469	29	13	30,5
S022CP04P016	467,0	10017	29	14	30,7
S022CP01P008	551,6	9532	26,6	16	30,9
S017CP03P070	576,6	11925	28	15	31,1
S017CP03P058	453,3	9846	30	13	31,4
S022CP02P031	514,5	10968	31	12	31,5
S022CP04P113	557,9	10527	29	14	31,5
S017CP03P057	481,5	9720	31	13	31,5
S022CP04P036	539,7	9917	26	18	31,6
S022CP02P023	515,6	10804	31	13	31,6
S017CP03P072	565,5	9594	29	14	31,6
S017CP03P085	411,9	10595	31	13	31,7
S022CP02P068	523,5	10479	32	12	31,8
S022CP02P053	550,1	11436	32	12	31,9
S017CP03P065	468,2	10335	32	12	32,0
S017CP03P105	523,3	10464	30	14	32,1
S022CP04P032	507,4	11024	27	17	32,4
S022CP02P007	532,5	10640	31	13	32,5
S022CP02P044	490,6	9718	33	12	32,9
S022CP02P001	489,5	9718	30	15	33,0
S017CP03P025	549,5	10861	31	14	33,1
S017CP03P064	470,8	10464	31	14	33,1
S017CP03P016	486,2	10861	32	14	33,4
S022CP02P043	533,3	10000	35	11	33,5
S017CP03P103	580,1	9846	30	16	33,5
S022CP02P048	509,8	9718	35	11	33,8
S022CP02P126	448,4	11948	34	12	34,0
S017CP03P030	568,0	11373	32	15	34,9
S022CP02P077	500,3	11267	37	10	35,3
S022CP04P125	620,4	10657	31,9	15	35,9
S022CP02P063	531,0	11776	38	12	37,4
S022CP04P034	556,6	9917	33	17	40,5
S022CP02P067	512,8	10640	44	12	43,4
S022CP02P059	560,4	12789	45	12	44,3
S022CP02P062	510,9	13330	47	11	45,1
S022CP01P003	603,7	10644	39,1	16	46,1
S022CP02P109	484,2	11267	29	29	102,6
S022CP04P080	670,7	10657	26	33	274,1

DATOS	132
POSICIÓN	6,6
EPN	16,8
FACTOR DE CORRECCIÓN	1/1,9
f <sub>(c,0),12% adm</sub> (MPa)	8,8

Anexo D: Cálculo valor admisible de resistencia a cizalle paralelo.

Code	p <sub>test</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>d</sub> (MPa)	f <sub>v</sub> (MPa)	CH	f <sub>v</sub> (MPa)
S022CZ02P061	413,4	10084	2,3	11	2,3
S022CZ02P009	385,1	9692	2,7	13	2,7
S022CZ02P082	416,4	9615	3,3	11	3,3
S022CZ02P081	453,4	10227	3,4	12	3,4
S022CZ02P078	476,7	9770	3,5	12	3,5
S022CZ02P068	470,0	10467	3,7	11	3,7
S022CZ02P136	432,3	9926	4,4	-	3,7
S022CZ04P076	442,4	10119	3,6	17	3,9
S022CZ02P186	501,8	9848	4,7	-	4,0
S022CZ04P024	480,2	10501	4,0	15	4,2
S022CZ02P190	451,0	10084	5,0	-	4,2
S022CZ02P113	548,8	10858	4,4	12	4,3
S022CZ04P075	463,7	10245	4,0	17	4,3
S022CZ02P008	457,2	10858	4,4	12	4,4
S022CZ04P133	444,4	9892	4,4	17	4,7
S022CZ04P050	446,9	9892	4,5	17	4,8
S022CZ02P027	579,5	11273	4,9	11	4,8
S022CZ02P175	515,3	10005	5,8	-	4,9
S022CZ02P146	508,3	10940	6,0	-	5,1
S022CZ02P057	451,3	10084	5,3	10	5,1
S022CZ04P136	418,6	10119	5,0	16	5,3
S022CZ02P168	537,2	10084	6,3	-	5,3
S022CZ04P129	449,4	9892	5,2	14	5,3
S022CZ04P011	625,0	10245	5,2	15	5,4
S022CZ04P111	539,4	12188	5,1	16	5,4
S022CZ02P189	496,5	11356	6,4	-	5,4
S022CZ04P004	501,3	10119	5,2	15	5,4
S022CZ04P102	503,8	11665	5,1	17	5,5
S022CZ04P128	404,7	10373	5,4	13	5,5
S022CZ04P138	477,1	11262	5,2	16	5,6
S017CZ03P099	487,7	10199	5,3	16	5,6
S022CZ04P079	538,3	9767	5,2	17	5,6
S022CZ02P121	504,6	11273	5,5	14	5,6
S022CZ02P154	502,3	11273	6,7	-	5,7
S022CZ02P145	459,6	10005	6,8	-	5,8
S022CZ04P054	468,6	9892	5,5	16	5,9
S022CZ02P176	527,5	11273	7,0	-	5,9
S022CZ04P055	477,9	10373	5,5	17	5,9
S022CZ02P089	491,2	10629	5,9	13	6,0
S022CZ02P126	459,2	10467	6,0	13	6,0
S022CZ02P148	499,7	12107	7,1	-	6,1
S022CZ02P139	494,4	11849	7,2	-	6,1
S022CZ04P110	530,6	9892	5,7	17	6,2
S022CZ02P021	421,6	10005	6,1	13	6,2
S022CZ04P051	561,8	10501	5,8	16	6,2
S022CZ04P137	549,0	11802	5,8	17	6,2
S022CZ02P193	550,3	9615	7,4	-	6,3
S022CZ02P052	452,0	11106	6,5	10	6,3
S022CZ04P068	476,3	10245	6,2	13	6,3

S022CZ02P102	457,1	10467	6,2	12	6,3
S022CZ02P144	487,0	10940	7,4	-	6,3
S022CZ02P147	484,5	11935	7,4	-	6,3
S022CZ02P188	544,7	9476	7,4	-	6,3
S022CZ02P124	540,6	9926	6,5	10	6,3
S022CZ04P030	529,7	9892	6,1	15	6,4
S022CZ02P036	483,9	10467	6,4	14	6,6
S022CZ02P171	530,8	10858	7,7	-	6,6
S022CZ04P034	528,4	9643	6,3	15	6,6
S022CZ04P040	502,0	10373	6,4	15	6,7
S022CZ02P143	513,3	10467	7,8	-	6,7
S022CZ02P054	492,7	12194	6,3	16	6,7
S022CZ02P112	484,3	10858	6,8	12	6,7
S022CZ02P031	419,7	11440	6,9	10	6,7
S022CZ02P165	587,4	10307	8,0	-	6,8
S022CZ04P081	514,0	12892	6,3	18	6,8
S022CZ04P002	550,5	10373	6,7	14	6,9
S022CZ02P114	514,1	10467	7,0	12	7,0
S022CZ02P101	531,3	11189	6,9	13	7,0
S022CZ02P019	487,2	11106	7,0	13	7,1
S022CZ02P039	462,3	9848	7,2	11	7,1
S022CZ02P025	479,7	10307	7,0	13	7,1
S022CZ02P051	482,2	9476	7,4	11	7,2
S022CZ04P080	513,6	9643	6,6	17	7,2
S022CZ02P123	546,7	10084	7,4	11	7,3
S022CZ04P006	590,4	11665	6,9	16	7,4
S022CZ02P018	524,5	9770	7,3	14	7,5
S022CZ04P062	503,3	12077	7,3	14	7,6
S022CZ02P118	505,9	9615	7,6	12	7,6
S022CZ02P040	492,3	10710	7,6	12	7,6
S022CZ02P087	520,6	12351	7,4	14	7,6
S022CZ04P086	534,3	10996	7,4	15	7,6
S022CZ02P058	546,8	9553	7,8	11	7,6
S022CZ01P017	507,0	10507	7,3	16	7,7
S022CZ02P028	523,9	10164	7,7	12	7,7
S017CZ03P103	553,6	10983	7,4	15	7,8
S022CZ02P086	552,6	9476	7,7	13	7,8
S022CZ01P010	575,4	9898	7,4	16	7,8
S017CZ03P036	503,3	10719	7,5	15	7,8
S022CZ04P005	540,6	11665	7,6	15	7,9
S022CZ02P053	508,2	10387	8,2	10	7,9
S022CZ02P090	533,6	10858	7,9	12	8,0
S022CZ01P016	560,9	9773	7,5	16	8,0
S022CZ02P116	503,5	11935	8,0	13	8,0
S022CZ02P122	561,5	12264	8,1	12	8,1
S022CZ02P067	532,3	12527	8,2	11	8,1
S022CZ02P130	472,2	9848	7,9	15	8,3
S022CZ02P023	483,9	12351	8,4	11	8,3
S022CZ01P015	617,9	11673	7,8	16	8,4
S022CZ02P005	499,4	9926	8,6	11	8,5
S022CZ02P127	563,8	11764	8,9	12	8,9
S022CZ02P043	525,9	10387	8,8	13	8,9
S022CZ02P077	615,0	12439	8,9	13	9,0
S022CZ02P106	614,4	10227	8,9	13	9,1
S022CZ02P105	644,6	10940	9,0	13	9,2
S022CZ02P100	608,1	9848	9,1	13	9,3
S022CZ02P104	665,0	12107	9,3	13	9,4
S022CZ02P033	589,8	12021	9,6	12	9,6

DATOS	107
POSICIÓN	5,35
EPN	3,58
FACTOR DE CORRECCIÓN	1/4,1
$f_{v,12\% \text{ adm}} \text{ (MPa)}$	0,87

Anexo E: Cálculo valor admisible de resistencia a cizalle paralelo.

Code	p <sub>test</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>d</sub> (MPa)	f (t,0) (MPa)	CH	f (t,0),12% (MPa)
S017TP03P073	501,7	9599	1,3	12	1,3
S017TP03P068	481,6	11503	2,1	14	2,1
S022TP02P017	473,8	9424	4,2	10	4,2
S022TP02P108	484,0	9767	6,9	13	6,9
S022TP02P146	465,0	9477	7,0	14	7,0
S022TP04P085	453,3	9421	8,7	14	8,7
S022TP02P190	451,9	9580	8,9	11	8,9
S022TP02P159	435,1	9737	8,9	13	8,9
S022TP02P138	540,2	13648	8,9	14	8,9
S022TP02P012	401,6	10174	9,7	11	9,7
S022TP02P093	471,1	9444	10,0	12	10,0
S022TP02P160	434,6	9831	10,3	12	10,3
S022TP02P130	470,1	9885	10,7	14	10,7
S022TP02P170	548,9	14217	11,7	13	11,7
S022TP04P054	462,9	9667	11,8	16	11,8
S022TP02P032	422,8	10016	12,6	13	12,6
S022TP02P077	549,6	10334	12,6	12	12,6
S017TP03P001	468,9	9475	13,7	16	13,7
S022TP02P153	539,3	11836	14,0	13	14,0
S022TP02P102	489,5	10220	14,1	13	14,1
S022TP02P156	473,4	9991	14,4	12	14,4
S022TP02P154	507,3	10526	14,6	11	14,6
S017TP03P030	553,2	9599	15,2	15	14,9
S022TP02P119	447,3	9960	15,0	13	15,0
S022TP02P099	464,4	9784	15,2	13	15,2
S017TP03P036	479,9	9976	15,9	15	15,7
S017TP03P060	476,5	10206	16,2	14	16,2
S022TP04P056	454,4	9544	16,2	17	16,2
S017TP03P102	495,0	9599	16,4	14	16,4
S017TP03P113	466,0	11503	16,6	14	16,6
S017TP03P043	460,3	11232	17,0	14	16,8
S022TP02P125	459,1	10410	16,9	13	16,9
S022TP02P089	478,6	10016	17,3	13	17,3
S022TP02P094	458,9	9599	17,9	13	17,9
S022TP02P176	537,6	13621	18,1	12	18,1
S022TP04P103	531,5	10144	18,2	18	18,2
S022TP02P116	541,8	9844	18,3	14	18,3
S022TP02P165	468,0	11279	18,8	13	18,8
S022TP02P092	484,7	9783	19,4	13	19,4
S022TP02P096	458,7	12821	19,5	0	19,5
S017TP03P094	473,7	9599	19,5	13	19,5
S022TP02P164	461,2	11563	19,5	11	19,5
S022TP02P144	554,8	11800	19,8	15	19,8
S022TP02P151	508,4	11050	19,9	11	19,9
S022TP02P174	454,7	10921	20,2	10	20,2
S022TP02P133	516,8	12727	20,3	13	20,3
S017TP03P069	435,7	11124	20,6	14	20,6
S022TP02P023	452,3	10986	20,7	11	20,7
S017TP03P082	472,6	10464	21,0	13	21,0

S022TP02P187	490,4	10031	21,3	11	21,3
S022TP02P183	538,6	12844	21,6	13	21,6
S022TP02P036	476,9	9579	21,7	11	21,7
S017TP03P083	461,0	9599	22,0	13	22,0
S022TP02P014	496,2	11966	22,3	13	22,3
S022TP02P058	448,0	9424	22,9	12	22,9
S022TP02P070	508,3	9579	23,1	13	23,2
S017TP03P087	454,0	9723	23,2	12	23,2
S017TP03P026	403,6	10206	23,2	14	23,2
S022TP02P035	540,7	9579	23,4	11	23,3
S022TP02P163	481,1	9910	24,9	11	24,8
S022TP02P128	446,8	12165	24,9	14	24,9
S017TP03P103	513,6	10335	25,3	15	25,4
S022TP02P155	505,0	11477	25,6	11	25,5
S017TP03P070	495,4	11777	25,8	14	25,9
S017TP03P112	533,5	10335	26,2	15	26,4
S017TP03P032	402,6	9599	26,7	15	26,7
S022TP02P132	497,1	11936	26,7	14	26,8
S017TP03P021	457,6	9599	27,7	16	27,7
S017TP03P044	492,2	11124	27,8	14	27,8
S017TP03P018	497,0	10464	27,8	15	27,8
S017TP03P065	484,0	11124	28,4	14	28,6
S017TP03P101	510,7	10103	28,6	14	28,8
S022TP02P028	395,6	10174	29,1	10	28,9
S022TP02P112	454,3	9658	29,1	12	29,1
S022TP02P083	476,6	10016	29,2	14	29,4
S022TP02P143	556,6	14464	30,0	12	30,0
S022TP02P189	468,2	12186	30,6	11	30,5
S022TP04P105	524,8	10788	30,3	16	30,9
S022TP02P124	457,9	11897	30,9	13	31,1
S022TP04P117	544,0	11290	31,8	17	32,6
S022TP02P110	457,9	10559	32,5	14	32,9
S017TP03P074	531,3	9976	33,0	13	33,2
S022TP02P107	485,3	13528	34,1	12	34,1
S022TP04P090	412,4	10527	35,0	14	35,3
S022TP02P169	536,4	15564	36,1	11	36,0
S017TP03P031	583,8	9475	36,1	17	36,1
S022TP02P162	504,2	10124	36,6	11	36,4
S017TP03P079	515,2	10206	36,2	13	36,5
S022TP02P134	478,3	12979	37,3	11	37,0
S022TP04P108	435,6	11695	36,9	15	37,7
S022TP02P148	542,6	12904	38,0	11	37,8
S022TP04P093	423,6	10399	38,0	14	38,4
S022TP04P111	536,4	10788	38,4	16	39,6
S022TP02P142	527,8	14422	40,4	12	40,3
S017TP03P085	509,9	12335	39,9	14	40,4
S022TP02P192	516,4	12545	40,1	14	40,6
S022TP01P011	481,0	9779	40,0	16	41,3
S022TP02P040	443,1	10174	41,7	11	41,3
S022TP02P067	513,4	10016	41,4	13	41,8
S022TP02P188	535,6	11025	42,2	14	43,0
S022TP04P118	386,6	9792	43,0	12	43,1
S022TP04P109	472,9	10399	43,2	17	44,7
S022TP02P141	532,9	12592	44,7	12	44,7
S022TP02P095	444,4	9740	44,8	13	45,2
S022TP04P095	497,1	9421	43,4	17	45,2
S022TP04P099	440,8	11157	44,1	16	45,4
S022TP04P094	416,2	12639	47,0	15	48,1
S017TP03P089	447,1	10594	47,7	14	48,5
S022TP02P120	515,3	12094	48,6	13	49,2
S017TP03P076	510,4	11232	48,7	14	49,7
S022TP04P101	412,1	9792	48,8	16	50,3
S022TP04P092	462,1	9544	51,5	12	51,6
S022TP02P097	448,2	12160	52,0	13	52,3
S017TP03P100	508,3	11639	51,3	15	52,5
S022TP04P120	417,7	10271	55,0	12	55,0
S022TP04P110	530,2	11832	54,0	17	56,7
S022TP02P098	503,2	13819	56,5	13	57,0
S022TP02P135	540,5	14705	57,3	12	57,3

S022TP04P096	407,7	11695	57,0	16	59,2
S022TP02P139	489,3	12536	59,1	13	59,4
S022TP04P116	461,9	11969	57,6	16	60,2
S022TP02P136	513,2	12808	66,1	11	65,2
S022TP04P112	488,1	12107	62,8	16	65,7
S022TP02P131	542,2	16666	65,8	12	66,1
S022TP04P102	498,8	11157	65,0	17	68,2
S022TP04P113	449,1	10919	65,4	16	68,3
S022TP02P121	492,2	11055	69,3	12	69,2
S022TP02P147	593,4	18464	71,9	13	72,8
S017TP03P050	592,9	10206	72,0	15	74,3
S022TP04P106	501,0	10271	72,5	18	77,3
S022TP04P087	429,8	13211	86,5	13	87,1

DATOS	131
POSICIÓN	6,6
EPN	9,0
FACTOR DE CORRECCIÓN	1/2,1
f(t,0),12% adm (MPa)	4,3