

ACTUALIZAR TENSIONES BASICAS ADMISIBLES DE MADERA ASERRADA DE PINO RADIATA PARA USO DE ELEMENTOS LAMINADOS

S. Cartes Miranda¹, M. González Retamal² y J. Padilla Reyes³

RESUMEN:

El pino insignie (*Pinus radiata* D.DON) es una especie arbórea tipo conífera, originaria del suroeste de Estados Unidos fue introducido a Chile en el año 1888 en la ciudad de Concepción. En el año 2015 la producción de madera aserrada llegó a los 8,4 millones de m^3 donde el Biobío es la principal región productora con el 51,1% y el pino radiata es lejos la principal especie utilizada en esta industria, con una participación de 96% en la producción total. (INFOR, 2016).

La utilización de la madera como material estructural ha ido en aumento en los últimos años tanto en Chile como el extranjero (González, 2013). Una de las técnicas más utilizadas en el último tiempo es la laminación de madera por encolado. Esta consiste en fabricar un elemento de madera a partir de tablas o laminas. La normativa NCh2165 Of.91 utilizada actualmente para calcular elementos laminados no ha sido actualizada hace más de 20 años.

De lo anterior surge como objetivo de este estudio, actualizar las tensiones básicas admisibles de elementos laminados con Pino radiata mediante ensayos físicos y mecánicos, proveniente de la región del Biobío.

De los resultados experimentales se determinó que la resistencia del grado A es mayor que el grado B en cada tipo de sollicitación. Además, prácticamente todas las propiedades obtenidas corresponden a un valor menor a la estipulada por la norma. Lo anterior conlleva principalmente a la metodología utilizada en la época y cabe destacar que la muestra proviene de la octava región por lo que no representa al país.

ABSTRACT:

The pine insignie (*Pinus Radiata* D.DON) is a tree species type conifer, native to the southwestern United States was introduced to Chile in the year 1888 in the city of Concepcion. In the year 2015 sawn timber production came to the 8.4 million cubic meters, where the Biobío is the main producer region with 51,1% and the radiata pine is by far the main species used in this industry, with a 96% share in total production. (INFOR, 2016).

The use of wood as a structural material has been on the rise in recent years both in Chile and abroad (González, 2013). One of the methods most commonly used in recent times is the lamination of wood by gluing. It consists of making an element of wood from tables or sheets. NCh2165 Of.91 codes currently used to calculate laminate components is not updated for more than 20 years.

Objective of this study is update admissible basic tensions of elements laminated with radiata pine by physical and mechanical trial, from the region of the Biobío.

The experimental results proved that the strength of grade A is greater than grade B in each type of sollicitation. In addition, virtually all properties obtained correspond to one value less than that stipulated by the rules. consequence of the previous is because for the methodology used at the time and the timber comes from the eighth region by not representing the country.

PALABRAS CLAVES: Elementos Laminados- laminated lumber, Grado Estructural- Structural Grade.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, scartes@ing.ucsc.cl

² Profesor Part-time, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, marcelo.gonzalez@infor.cl

³ Profesor Part-time, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jpadilla@magister.ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN.

La madera es el único material de construcción renovable, a través de la reforestación se evita dañar el ecosistema y la tala de bosques nativos. El impacto ambiental generado por la producción de madera es el más bajo comparado con otros materiales utilizados en construcción, aporta una mayor eficiencia energética y su construcción es un 33% de ejecución más rápida. (INFOR, 2015).

Al año 2014 las plantaciones forestales chilenas cubrían una superficie total de 2.426.722 hectáreas, de las cuales 59,1% corresponde a la especie Pino radiata, concentradas entre la VII y IX región. Sin embargo, en los últimos años se observa una tendencia a la baja en la participación de esta especie, aumentando las plantaciones de eucaliptus de acuerdo a las cifras disponibles del Instituto Forestal. (INFOR, 2016).

La utilización de la madera como material estructural ha ido en aumento en los últimos años tanto en Chile como en el extranjero. Países como Estados Unidos (90%), Canadá (95%), Suecia (75-85%), Australia y Nueva Zelanda (60-70%) este elemento es el material de construcción más utilizado. (González, 2013).

La técnica de laminación de madera por encolado ha sido uno de los desarrollos más importantes de la construcción en madera, las láminas son las capas individuales que constituyen un elemento encolado y pueden estar formadas por una o más piezas de madera aserrada empalmadas longitudinal y eventualmente en forma transversal, de manera de cubrir todo el ancho y longitud del elemento. Condicionada por su proceso de fabricación posee grandes ventajas frente a la madera aserrada, además de que se abren nuevas posibilidades sobre todo compitiendo con el acero estructural.

La clasificación estructural de la madera se realiza mediante un proceso en el cual se reúnen las piezas según su capacidad para resistir cargas o esfuerzos. Con esto se asegura una confianza de esperar un valor mínimo de resistencia para las piezas de un determinado grado estructural, independiente del origen del material. Cada grado se asocia con un conjunto de tensiones admisibles que permiten diseñar estructuras de madera en forma segura y confiable.

Existen dos métodos de clasificación estructural de madera: la clasificación mecánica y la clasificación visual. La primera consiste en someter a las piezas a un ensayo no destructivo por medio del cual se determina la rigidez y se asocia a una clase estructural. Por otro lado, la clasificación visual consiste en examinar y cuantificar una serie de características de la madera, tales como nudos, inclinación de la fibra, grietas, alabeos, etc. La clasificación visual debe ser realizada por clasificadores profesionales, que corresponde a personal entrenado para realizar esta labor en los aserraderos. Un clasificador requiere de un entrenamiento y formación adecuados, por medio de cursos que sean realizados por entidades técnicamente competentes, y reconocidas por el mercado y la autoridad reguladora.

El presente estudio contiene los resultados de los ensayos mecánicos aplicados en madera aserrada de pino radiata provenientes de la VIII región, los cuales fueron clasificados previamente en los grados visuales estructurales A y B, que se utilizan en la fabricación de elementos laminados. Los resultados se compararon con las tensiones básicas admisibles mostradas en la NCh2165. Of1991.

Se analizó el comportamiento de los elementos sometidos a sollicitaciones de tracción y compresión paralela a las fibras. Flexión y cizalle para laminación vertical y horizontal, obteniendo los valores para el Módulo de Elasticidad en los grados A y B.

Se obtuvieron, gráficos de Elasticidad-Resistencia y Densidad-Resistencia, los que reflejan los resultados obtenidos a partir de los ensayos.

Los ensayos se efectuaron en el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal(LME-INFOR), este cuenta con la acreditación de su sistema de gestión basado en la norma ISO 17.025, reconociendo sus resultados a nivel nacional e internacional.

2. METODOLOGIA

2.1 Madera

La madera de Pino Radiata utilizada en el presente estudio proviene desde distintos aserraderos en la Provincia del Biobío. El universo total de piezas fueron 1.800 de escuadría de 33x138 mm.

2.2 Clasificación visual.

La norma chilena NCh2150 Of.1991 establece las características mínimas exigibles a la madera aserrada de pino radiata, para cumplir con los grados estructurales visuales A y B destinada a la fabricación de elementos laminados encolados como se observa en la tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones para los grados definidos al usar una clasificación estructural visual.

Característica o defecto		Especificaciones				Observación
		Grado A		Grado B		
Agujeros – Nudos sueltos – Nudos firmes		La suma de las magnitudes de todos los nudos contenidos en cada longitud de 300 mm, tomada en intervalos de 60 mm no debe exceder:				a= ancho de la cara
		35% del ancho de la cara (0,35a)		De ½ del ancho de la cara (0,5a)		
Alabeos	Acanaladura	Se acepta con las magnitudes máximas siguientes:				Para laminas delgadas (menos de 25mm) estos requerimientos pueden rebajarse cuando se dispone de un adecuado sistema de prensado que elimine la distorsión durante el ensamblado
		Espesor nominal, mm	Acanaladura máxima admisible, mm			
			Ancho nominal, mm			
			100 o menos	150	200 o mas	
		25	Ninguna	1	3	
	38	Ninguna	1	2		
	50	Ninguna	Ninguna	1		
	Arqueadura, encurvadura y torcedura	Se acepta con una magnitud máxima de 1,2 cm en 360 cm de longitud				
Arista faltante (Canto muerto)		Se acepta en un canto a lo largo de la pieza, si la magnitud máxima del defecto es 4mm, la cual debe desaparecer cuando el elemento laminado sea cepillado				
Bolsillos		Se aceptan bolsillos “secos”, con un ancho máximo de 3 mm y con una longitud igual al ancho de la pieza siempre que ellos aparezcan ocasionalmente				
Contenido de humedad		No mayor que 16%				
Desviación de la fibra		Menor que 1:10		Menor que 1:8		
Grietas y rajaduras		Las piezas deben estar “sin” grietas, rajaduras o acebolladuras que formen un ángulo menor o igual a 45° con la cara de la pieza				
Manchas y médula		Se acepta la mancha azul y la presencia de médula solo en el grado B, con excepción de las dos laminas externas, en ambos cantos de la pieza laminada				
Pudrición y perforación		No se aceptan				
Resina		No se aceptan piezas con alto contenido de resina en la superficie a encolar				
Velocidad de crecimiento		Mas de 0,8 anillo por cada cm		Mas de 0,7 anillo por cada cm		

Fuente: NCh2150 Of.1991.

2.3 Tipos de laminados

Existen dos tipos de laminados para la madera laminada encolada:

Laminación Horizontal: Las láminas son paralelas al plano neutro de flexión del elemento.

Laminación Vertical: Las láminas son perpendiculares al plano neutro de flexión del elemento.

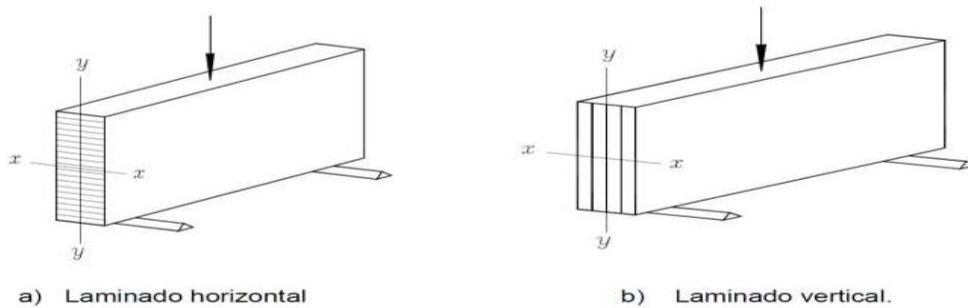


Figura 1: Tipos de laminados. Fuente: Curso calculo estructural en madera.

2.4 Propiedades mecánicas de la madera

Con el fin de caracterizar cada tipo de solicitación a la que puede estar expuesta la madera como material estructural, se determinan las propiedades mecánicas de estas mediante ensayos de resistencia y rigidez en flexión, resistencia al cizalle para laminación horizontal y vertical, resistencia a la tracción paralela a las fibras y resistencia a la compresión paralela a las fibras. Además, como la madera es un material higroscópico, por lo que su masa y volumen varían con el contenido de humedad, se debe determinar el contenido de humedad y densidad en cada probeta al momento de ser ensayada.

Utilizando la norma NCh3028/1 Of.2006 ‘*Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia – Parte 1: Métodos de ensayo en tamaño estructural*’ se establecen los métodos para determinar los valores de cada propiedad mecánica y densidad de la madera.

2.4.1 Densidad

Para determinar la densidad de cada probeta, las piezas de madera ensayadas deben incluir la sección transversal completa y la longitud de la probeta debe ser mayor al ancho de la pieza (b). La masa (m) y el contenido de humedad (H) son medidos para cada probeta de ensayo. La densidad al momento del ensayo (ρ_e) se calcula a partir de:

$$\rho_e = \frac{m * 10^9}{L * d * b} \quad (1)$$

La densidad al 12% de humedad en masa, ρ_{12} , se debe calcular:

$$\rho_{12} = \rho_e * \left(\frac{1,12}{1 + H} \right) \quad (2)$$

Donde:

H= Contenido de humedad en el momento del ensayo, determinado por el método de secado al horno, expresado en porcentaje.

2.4.2 Resistencia y rigidez en flexión

El ensayo de flexión mide la resistencia que posee una viga de luz 18b al aplicar una carga en dos puntos a igual distancia entre los soportes de los extremos, con carga igual a F/2. Junto con medir el desplazamiento en el centro de la luz a medida que se incrementa gradualmente la carga hasta su estado de falla. Si la viga es muy delgada se pueden usar apoyos laterales para limitar el pandeo lateral sin que estos generen una resistencia alguna al movimiento en la dirección de la carga. En la figura 2 se muestra un esquema del ensayo de flexión.

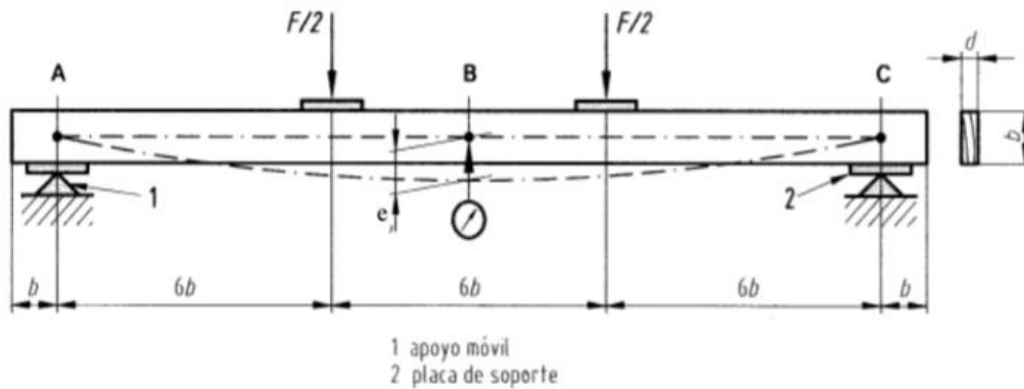


Figura 2: Esquema ensayo de resistencia y rigidez en flexión. Fuente: NCh3028/1 Of.2006.

El módulo de elasticidad (E), se debe calcular a partir de la deflexión en el eje neutro de la viga (e), ubicado en el punto central B como muestra la figura anterior. Si no es posible medir la deflexión en el punto central, una opción es medir la deflexión del punto central del canto de la viga con respecto a los soportes de los extremos.

Con la información obtenida del ensayo se calcula el módulo de elasticidad en flexión (E) para cada pieza de madera ensayada:

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

Dónde:

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 elástica de la curva carga-desplazamiento, que se forma de los datos tomados entre el 10% y 40% de la carga máxima.

La resistencia a flexión (f_m) se calcula:

$$f_m = \frac{F_{m\acute{a}x} * L}{d * b^2} \quad (4)$$

Dónde:

$F_{m\acute{a}x}$: Valor de la carga aplicada en falla (carga máxima).

Las siguientes figuras muestra la aplicación de un ensayo de flexion para laminacion vertical (Figura 3) y laminacion horizontal (Figura 4).



Figura 3: Ensayo de flexión laminación vertical. Fuente: Elaboración propia.

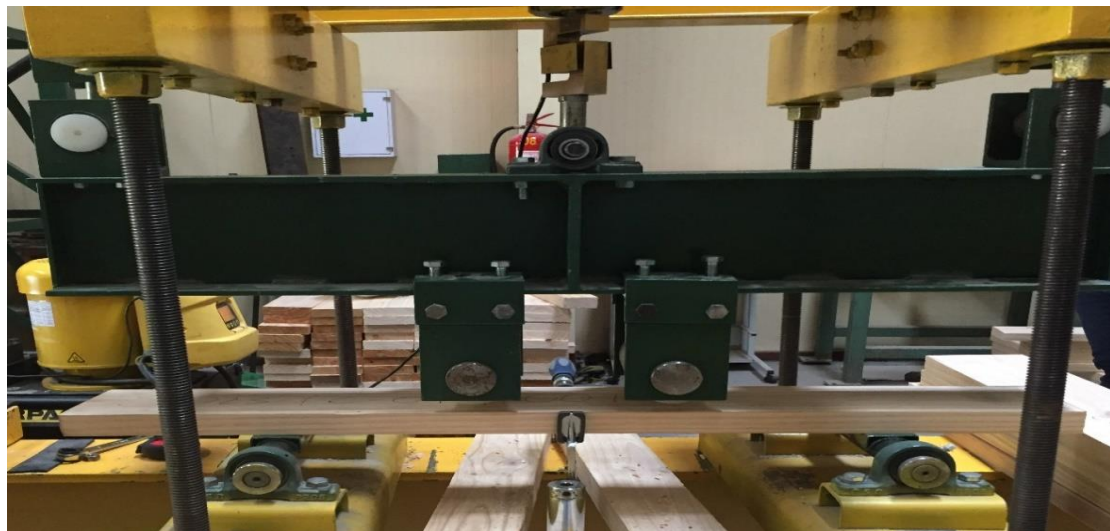


Figura 4: Ensayo de flexión laminación horizontal. Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Resistencia a la tracción paralela a la fibra

El ensayo de tracción paralela a las fibras mide la resistencia que posee una viga, de longitud igual a 2.000 milímetros más 8 veces su ancho (b) entre las mordazas. Esta es sometida a un esfuerzo axial creciente hasta que se produzca la rotura de la probeta, como muestra la figura 5.

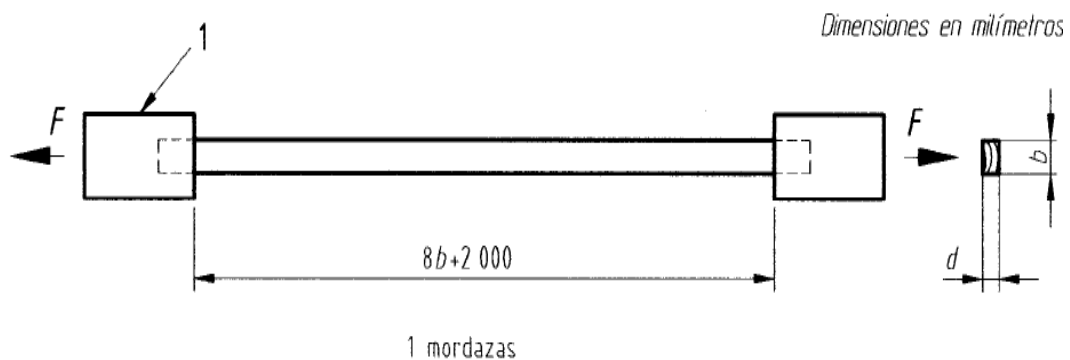


Figura 5: Esquema ensayo tracción paralela a las fibras. Fuente: NCh3028/1 Of.2006.

La resistencia a la tracción $f_{t,0}$ se calcula:

$$f_{t,0} = \frac{F_{max}}{d * b} \quad (5)$$

Donde:

F_{max} = Valor de la carga aplicada en la falla (carga máxima).

En la figura 6 se observa la aplicación de un ensayo de tracción paralela.



Figura 6: Ensayo de tracción paralela a las fibras. Fuente: Elaboración propia.

2.4.4 Resistencia a la compresión paralela a las fibras

El ensayo de compresión paralela a las fibras mide la resistencia que posee una viga, de longitud igual a 2.000 milímetros más 8 veces su ancho (b) entre las mordazas. Esta es sometida a un esfuerzo de compresión axial creciente hasta que se produzca la fractura. La probeta debe ser fijada para evitar el pandeo lateral a distancias no mayores que 10 veces su espesor (d) respecto al eje mayor y 10 veces su ancho (b) respecto al eje menor. La fijación lateral no debe producir resistencia alguna en la dirección de la carga. La figura 7 muestra el esquema de un ensayo de compresión paralela a las fibras.

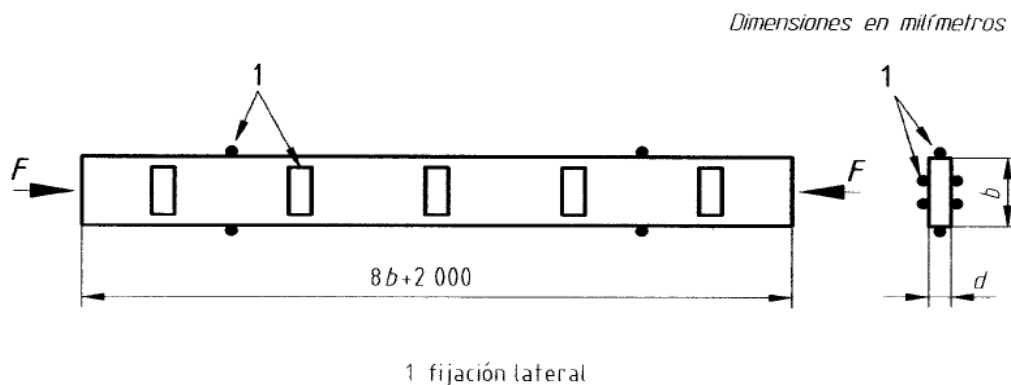


Figura 7: Esquema de ensayo compresión paralela a las fibras Fuente: NCh3028/1 Of.2006.

La resistencia a la compresión paralela a las fibras $f_{c,0}$ se calcula:

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{b * d} \quad (6)$$

Donde:

F_{max} : Valor de la carga aplicada en la fractura

En la figura 8 se observa la aplicación de un ensayo de compresión paralela.

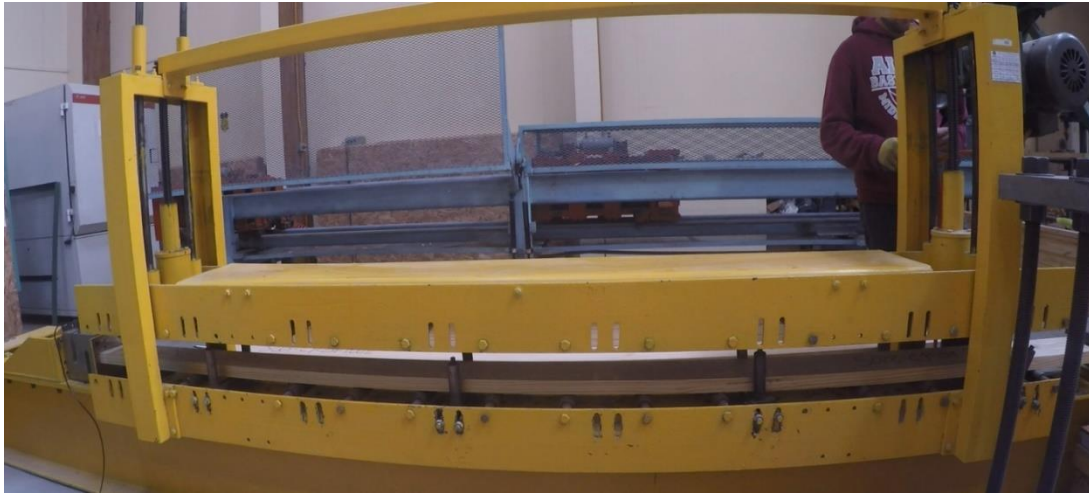


Figura 8: Ensayo compresión paralela a las fibras Fuente: Elaboración propia.

2.4.5 Resistencia al cizalle paralelo a la fibra

El ensayo de cizalle paralelo a la fibra mide la resistencia que posee una viga, de longitud igual 8 veces el ancho (b) de la probeta y la luz del ensayo debe ser 6 veces el ancho (b). Esta es sometida a una carga puntual creciente ubicada en el centro hasta que se produzca la falla. La figura 9 muestra el esquema de un ensayo de resistencia al cizalle paralelo.

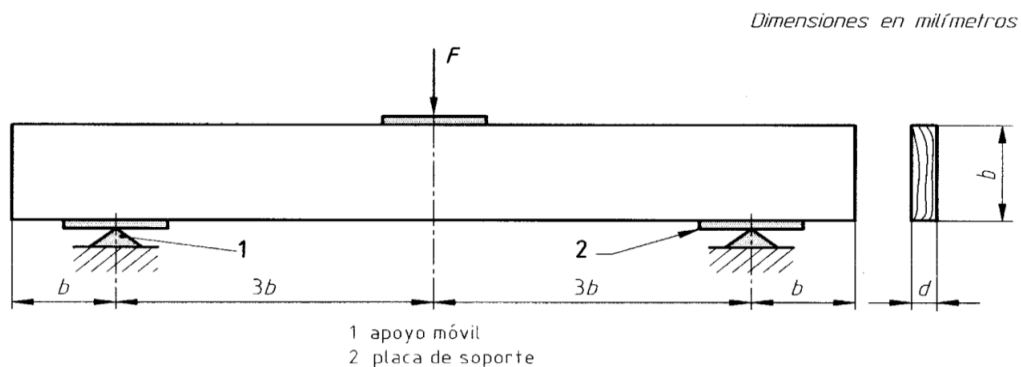


Figura 9: Esquema ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras. Fuente: NCh3028/1 Of.2006.

La resistencia al cizalle paralelo (f_v) se calcula:

$$f_v = \frac{0,75 * F_{max}}{b * d} \quad (7)$$

Donde:

F_{max} : Valor de la carga aplicada en la falla.

Las siguientes figuras muestra la aplicación de un ensayo de resistencia al cizalle para laminacion vertical (Figura 10) y laminacion horizontal (Figura 11).



Figura 10: Ensayo de resistencia al cizalle lam.Horizontal.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 11: Ensayo de resistencia al cizalle lam.Vertical.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Determinación de los Valores Admisibles y Característicos

La determinación de los valores admisibles para los grados estructurales visuales A y B de pino radiata, se realiza según análisis estadísticos y especificaciones de la norma chilena NCh3028/2 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 en tamaño estructural*”.

Esta norma especifica los procedimientos de muestreo y evaluación de las propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada 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 realizados de acuerdo a la metodología establecida en la norma chilena NCh3028/1 Of.2006 deben ser ajustados a un contenido de humedad único, apropiado para el objetivo del programa experimental, generalmente este es de un 12%.

Las ecuaciones de ajuste para módulo de rotura en flexión, la resistencia de tracción paralela a la fibra y la resistencia de compresión paralela a la fibra son:

$$P_2 = P_1 \quad \text{Para: } \begin{array}{l} \text{Modulo de rotura en flexión} \leq 16,6 \text{ MPa.} \\ \text{Rotura tracción paralela} \leq 21,7 \text{ MPa.} \\ \text{Rotura en compresión paralela} \leq 9,65 \text{ MPa.} \end{array} \quad (8)$$

$$P_2 = P_1 + \left\{ \frac{(P_1 - B_1)}{(B_2 - H_1)} \right\} (H_1 - H_2) \quad \text{Para: } \begin{array}{l} \text{Modulo de rotura en flexión} > 16,6 \text{ MPa.} \\ \text{Rotura tracción paralela} > 21,7 \text{ MPa.} \\ \text{Rotura en compresión paralela} > 9,65 \text{ MPa.} \end{array} \quad (9)$$

Donde:

P_1 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 1, expresado en (MPa).

P_2 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 2, expresado en (MPa).

H_1 : Contenido de humedad 1, expresado en (%).

H_2 : Contenido de humedad 2, expresado en (%).

B_1, B_2 : Constantes según tabla 2.

Tabla 2: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para resistencia en flexión, tracción y compresión.

Coefficientes	MdR_f	R_{tp}	R_{cp}
B_1	16,65	21,72	9,65
B_2	40	80	34

Fuente: NCh3028/2 Of.2008.

La ecuación de ajuste para la resistencia de cizalle paralelo a la fibra (R_{cz}), la resistencia de compresión normal a la fibra (R_{cn}) y el módulo de elasticidad en flexión (E) es:

$$P_2 = P_1 \frac{[B_1 - (B_2 * H_2)]}{[B_1 - (B_2 * H_1)]} \quad (10)$$

Donde:

P_1 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 1, expresado en (MPa).

P_2 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 2, expresado en (MPa).

H_1 : Contenido de humedad 1, expresado en (%).

H_2 : Contenido de humedad 2, expresado en (%).

B_1, B_2 : Constantes según tabla 3.

Tabla 3: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para elasticidad en flexión y resistencia al cizalle.

Coefficientes	R_{cz}	R_{cn}	E
B_1	1,33	1,00	1,857
B_2	0,0167	0	0,0237

Fuente: NCh3028/2 Of.2008.

Estas relaciones se restringen a contenidos de humedad entre el 10% y 23%. Para valores inferiores o superiores a los límites, se deben considerar estos últimos en las fórmulas.

Para estandarizar a valores aparentes el módulo de elasticidad ensayado ($E_{f12\%}$), con el fin de reflejar las condiciones de uso previstas, como relación luz/profundidad y distintas configuraciones de cargas se utiliza la siguiente formula:

$$E_{ai} = \frac{1 + K_1 \left(\frac{h_1}{L_1}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right)}{1 + K_2 \left(\frac{h_2}{L_2}\right)^2 \left(\frac{E}{G}\right)} * E_{f12\%} \quad (11)$$

Donde:

h : altura de la sección transversal de la viga.

L : distancia total entre los apoyos de la viga.

E : módulo de elasticidad libre del efecto del esfuerzo de corte.

G : módulo de rigidez.

K_i : valores indicados en la tabla 4.

E_{ai} : módulo de elasticidad al 12% de humedad aparente.

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 de corte). (INN Instituto de normalización nacional, 2008).

Tabla 4: 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 externos	Mitad del tramo	0,873
Concentrada en los puntos cuartos externos	Puntos de carga	1,2
Uniformemente distribuida	Mitad del tramo	0,960

Fuente: NCh3028/2 Of.2008.

Los factores de ajuste utilizados para reducir las estadísticas experimentales al nivel de las propiedades admisibles se indican en la Tabla 5. Estos se han obtenido de ASTM D 245 que incluye un factor de seguridad y un efecto de duración de carga por 10 años.

Tabla 5: Factores de reducción para relacionar estadísticas experimentales con las propiedades admisibles.

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

Fuente: NCh3028/2 Of.2008.

Para determinar los valores admisibles, la NCh3028/1 Of2006, ítem N°3 menciona el uso de un enfoque paramétrico y no paramétrico. En este estudio se llevó a cabo un enfoque no paramétrico, este es generalmente más conservador ya que en un enfoque paramétrico una mala hipótesis puede llevar a resultados imprecisos.

El enfoque no paramétrico indica que, para estimar el valor admisible, se debe encontrar el quinto percentil (5%) de los datos aparentes. Primero se deben ordenar los datos en forma ascendente, luego se calcula la probabilidad de frecuencia acumulada utilizando la siguiente expresión:

$$Poc = \frac{i}{n + 1} \quad (12)$$

Donde:

i : número de orden de la muestra.

n : número total de la muestra.

Se debe verificar que:

$$\frac{i}{n + 1} \geq \frac{k}{100} \quad (13)$$

Donde:

k : Estimador del punto porcentual deseado (5).

Si el valor es igualado entonces aquel número de orden de la muestra es la tensión esperada, en caso contrario, se debe encontrar el estimador de punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN), mediante interpolación utilizando la siguiente expresión:

$$EPN = \left[\frac{k}{100} (n + 1) - (j - 1) \right] [x_j - x_{(j-1)}] + x_{(j-1)} \quad (14)$$

Dónde:

j : Valor j^{avo} que excede el estimador del punto porcentual k de la muestra.

x_j : Valor experimental (tensión) que excede el estimador del punto porcentual k de la muestra.

Para el caso de módulo de elasticidad, el valor admisible se debe tomar del valor promedio de la muestra (\bar{X}) mediante la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (15)$$

Donde:

x_i : Observaciones individuales.

3. Resultados y Discusión.

3.1 Clasificación visual estructural y propiedades geométricas

A partir de un lote de 1.800 piezas de Pino radiata, con escuadría de 33x138 mm y largo de 3,20 metros, se realizó el proceso de clasificación visual, obteniendo 358 piezas del grado A y 360 piezas del grado B según especifica la NCh2150 Of1991. En la figura 12 se puede observar en detalle las causas de rechazo en las piezas inspeccionadas.

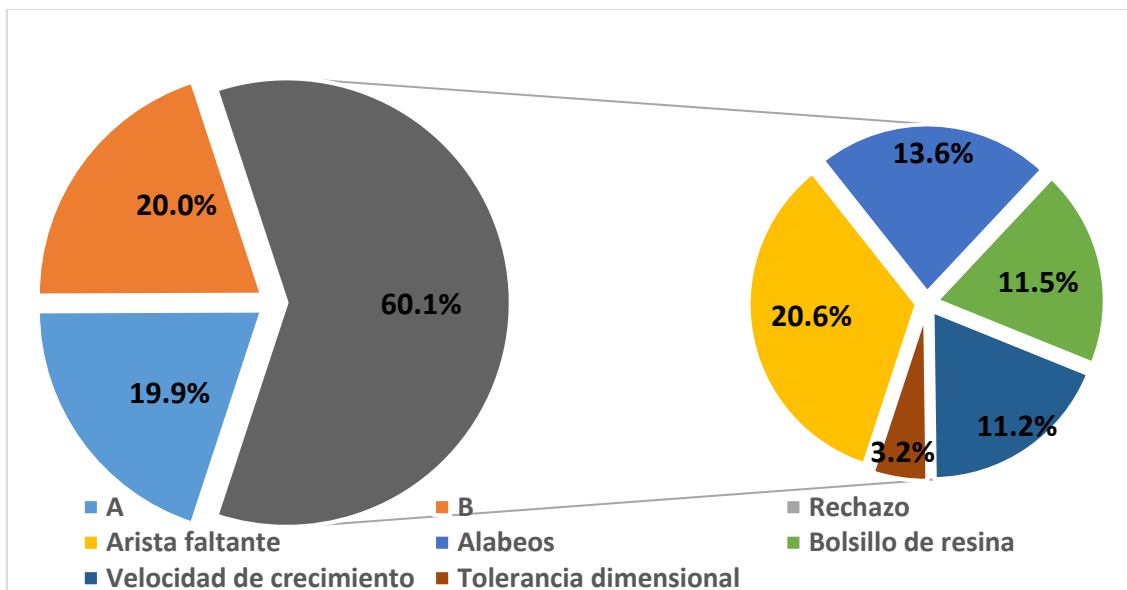


Figura 12: Clasificación visual.

Se puede observar en la tabla 6 que, para ambos grados estructurales las dimensiones promedio de ancho y espesor de las probetas ensayadas se encuentran dentro de la tolerancia que indica la NCh174 Of.1985 “*Maderas: unidades empleadas, dimensiones nominales, tolerancias y especificaciones*”.

Para el espesor se indica una tolerancia de +1 mm al espesor nominal, en cuanto al ancho se indica una tolerancia de +3 mm al ancho nominal.

Tabla 6: Resultados de las propiedades geométricas de un total de 358 piezas del grado A y 360 piezas del grado B.

Grado	A		B	
	Ancho(mm)	Espesor(mm)	Ancho(mm)	Espesor(mm)
Promedio	139,3	33,9	139,3	33,8
Desviación Estándar	0,5	0,3	0,4	0,3

3.2 Ensayos físicos y mecánicos

Las 718 piezas de madera aserrada clasificada en los grados estructurales visuales A y B, fueron utilizadas para realizar los ensayos físicos y mecánicos según la distribución que se indica en la tabla 7.

Tabla 7: Cantidad de piezas en grados NCh2150 Of.1991 por tipo de ensayo.

Ensayos	Laminación Horizontal		Laminación Vertical		Total
	Grado A	Grado B	Grado A	Grado B	
Flexión	60	60	60	60	240
Cizalle	60	60	58	60	238
Tracción paralela	--	--	60	60	120
Compresión paralela	--	--	60	60	120
Total	120	120	238	240	718

A continuación, se muestra la estadística descriptiva de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia en flexión, rigidez en flexión, resistencia a la tracción paralela, resistencia a la compresión paralela y resistencia al cizalle paralelo. Calculados con un 12% de humedad. Además, se incluye un histograma de cada ensayo y los resultados de densidad en los grados estructurales visuales A y B.

3.2.1 Resistencia y rigidez en flexión

Tabla 8: Modulo de rotura en flexión.

Descripción	Laminación Horizontal		Laminación Vertical	
	Grado A	Grado B	Grado A	Grado B
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Promedio	68,4	53,8	53,4	37,5
Valor máximo	96,0	99,3	79,9	73,2
Valor mínimo	37,8	27,0	18,8	7,9
Rango	58,2	72,3	61,1	65,3
Desviación estándar	11,8	13,5	16,1	15,4
Coefficiente de variación	17%	25%	30%	41%
Tamaño de la muestra	60	60	60	60
Valor percentil 5%	45,6	30,5	23,7	13,5

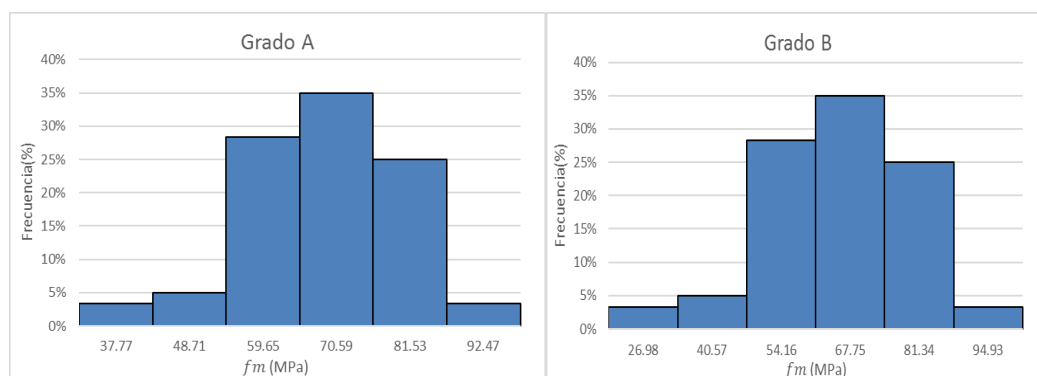


Figura 13: Histograma de tensión de rotura en flexión laminación horizontal grados A y B.

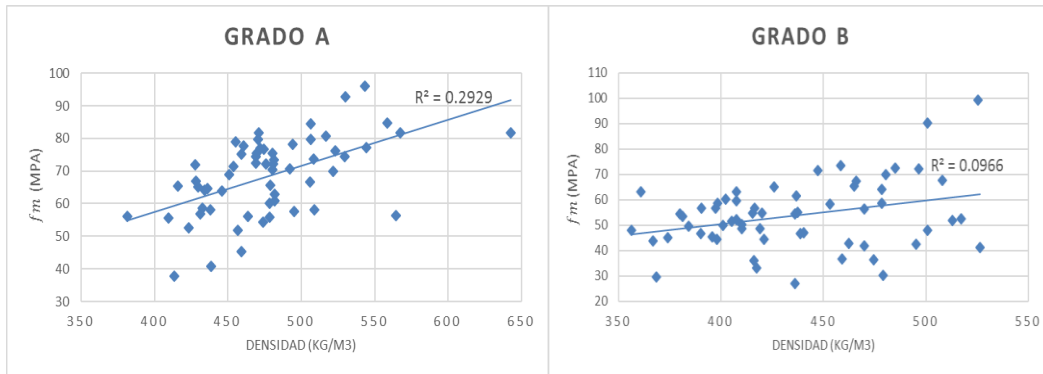


Figura 14: Correlación entre densidad y tensión de rotura en flexión laminación horizontal grados A y B.

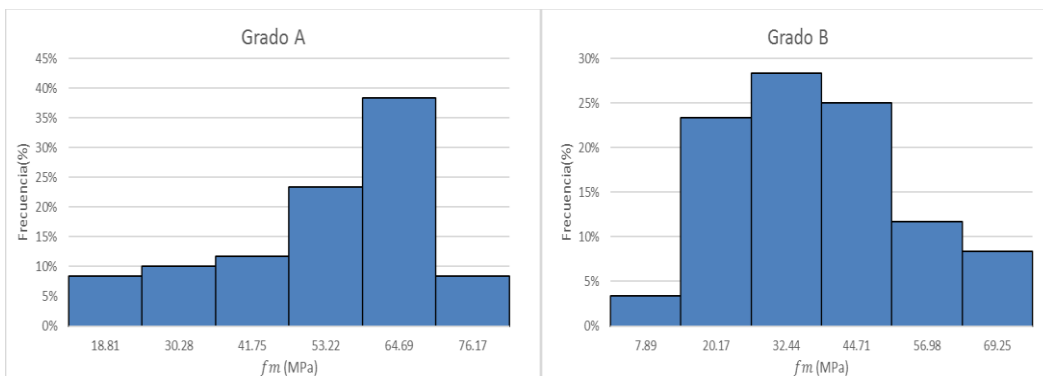


Figura 15: Histograma de tensión de rotura en flexión laminación vertical grados A y B.

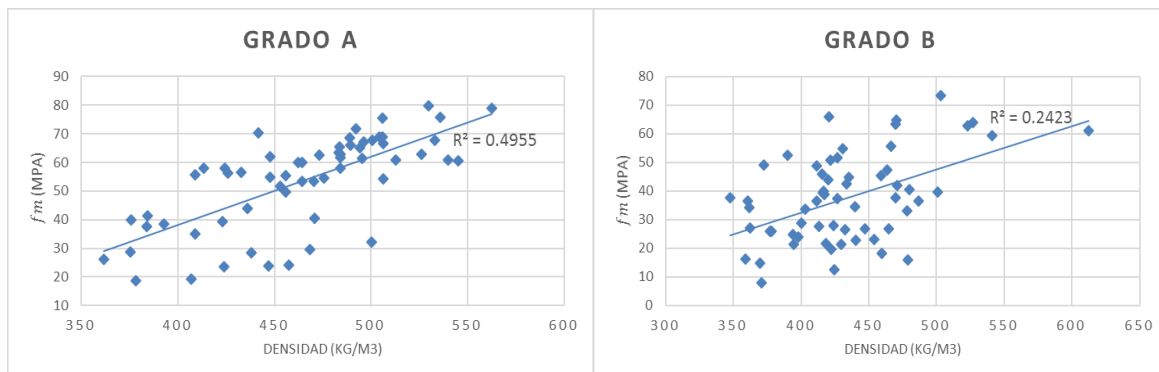
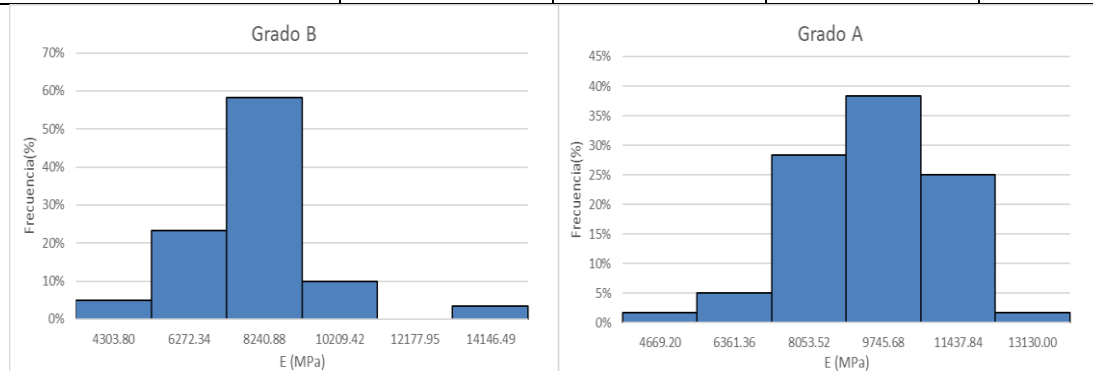
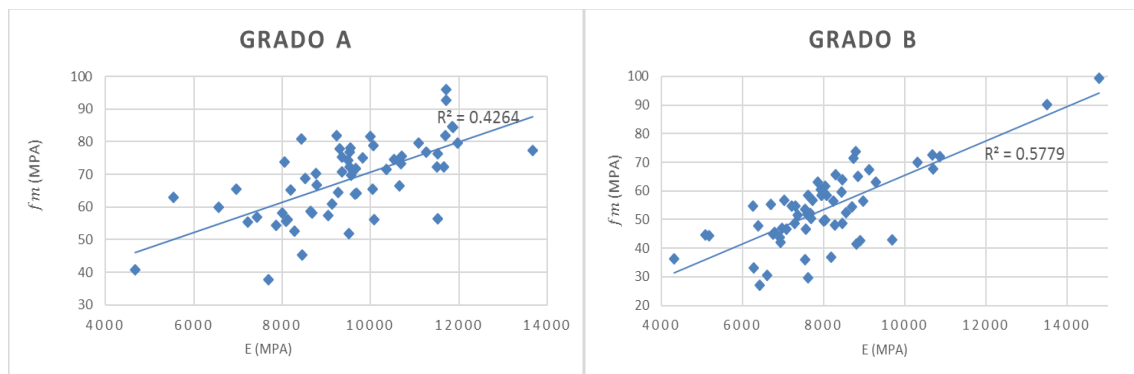
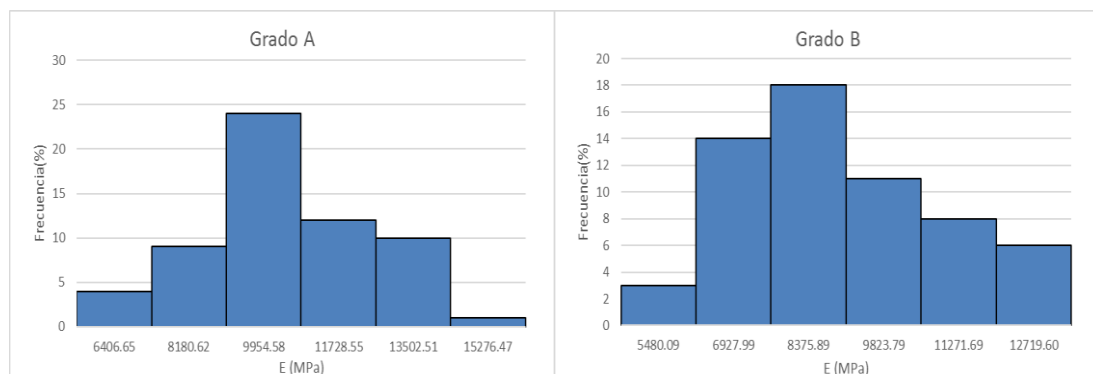


Figura 16: Correlación entre densidad y tensión de rotura en flexión laminación vertical grados A y B.

Como se puede observar, los valores promedio de la resistencia en flexión fluctúan entre 68,4 MPa y 53,8 MPa, con variaciones entre 17% y 25% para laminación horizontal y entre 53,4 MPa y 37,5 MPa con variaciones entre 30% y 41% para laminación vertical (Tabla 8). Además, el grado A presenta una tendencia entre 59,6 MPa y 81,5 MPa para laminación horizontal y 53,2 MPa y 64,7 MPa para laminación vertical, mientras que el grado B presenta una tendencia entre 54,1 MPa y 81,3 MPa para laminación horizontal y 20,2 MPa y 44,7 MPa para laminación vertical (Figuras 13 y 15).

Tabla 9: Modulo de rigidez flexión.

Descripción	Laminación Horizontal		Laminación Vertical	
	Grado A	Grado B	Grado A	Grado B
	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
Promedio	9.494,5	8.042,2	10.500,4	8.949,2
Valor máximo	13.676,0	14.781,6	15.848,8	13.186,8
Valor mínimo	4.669,2	4.303,8	6.406,7	5.480,1
Rango	9.006,8	10.477,8	9.442,2	7.706,7
Desviación estándar	1.678,0	1.709,3	1.989,2	1.967,3
Coefficiente de variación	18%	21%	19%	22%
Tamaño de la muestra	60	60	60	60


Figura 17: Histograma de módulo de rigidez en flexión laminación horizontal grados A y B.

Figura 18: Correlación entre módulo de rigidez y tensión de rotura en flexión laminación horizontal grados A y B.

Figura 19: Histograma de módulo de rigidez en flexión laminación vertical grados A y B.

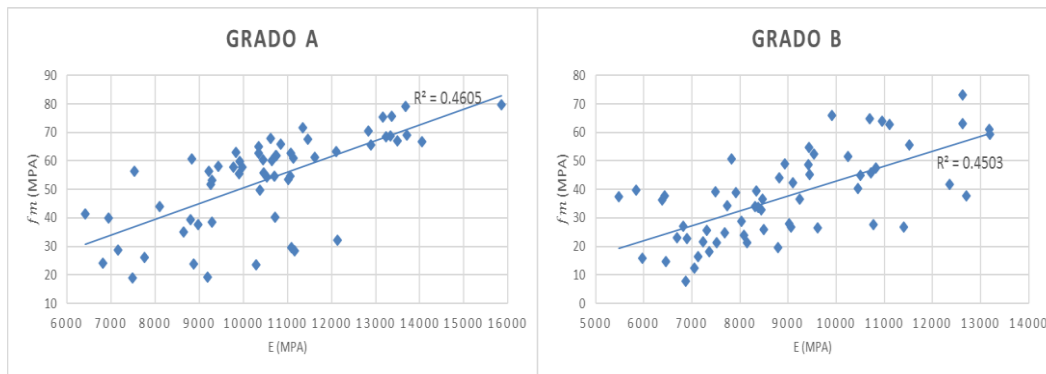


Figura 20: Correlación entre módulo de rigidez y tensión de rotura en flexión laminación vertical grados A y B.

La rigidez en flexión tiene valores promedios entre 9.494,5 MPa y 10.500,4 MPa para grado A. 8.042,2 MPa y 8.949,2 MPa para grado B (Tabla 9). Además, el grado A presenta una tendencia entre 8.053,5 MPa y 11.437,8 MPa para laminación horizontal y 8.186,6 MPa y 13.502,5 MPa para laminación vertical, mientras que el grado B presenta una tendencia entre 6.272,3 MPa y 10.209,4 MPa para laminación horizontal y 6.928 MPa y 9.823,8 MPa para laminación vertical (Figuras 17 y 19).

3.2.2 Resistencia a la tracción paralela a la fibra

Tabla 10: Tensión de rotura en tracción paralela.

Descripción	Laminación Vertical	
	Grado A	Grado B
	(MPa)	(MPa)
Promedio	37,7	18,3
Valor máximo	71,6	43,6
Valor mínimo	10,9	5,8
Rango	60,6	37,8
Desviación estándar	17,0	8,9
Coefficiente de variación	45%	49%
Tamaño de la muestra	60	60
Valor percentil 5%	16,8	7,6

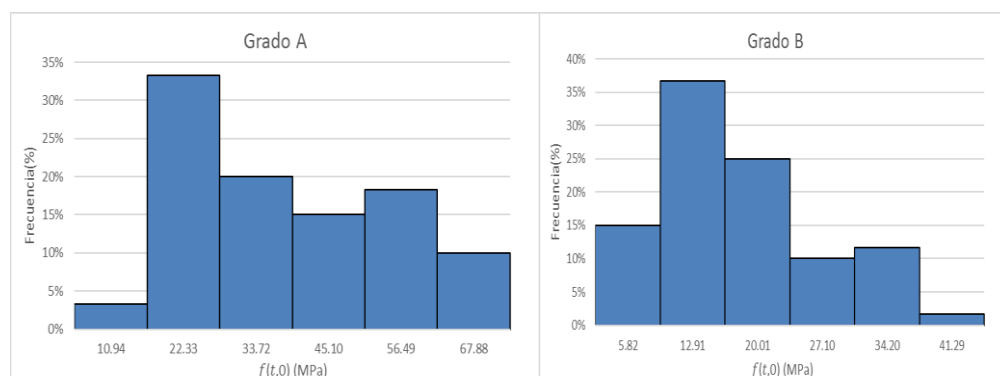


Figura 21: Histograma de tensión de rotura en tracción paralela laminación vertical grados A y B.

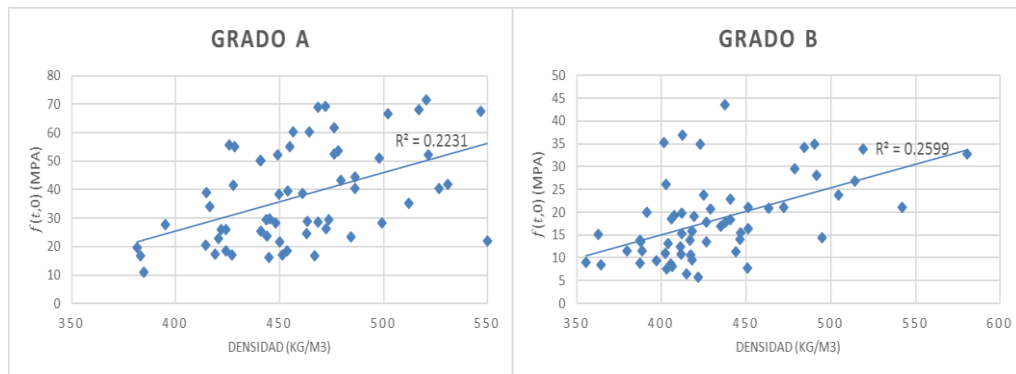


Figura 22: Correlación entre densidad y tensión de rotura en tracción paralela laminación vertical grados A y B.

La resistencia a la tracción paralela presenta valores promedio entre 37,7 MPa y 18,3 MPa con coeficientes de variación de 45% y 49% ambos muy cercanos (Tabla 10). Además, el grado A presenta una tendencia entre 22,3 MPa y 56,5 MPa, mientras que el grado B entre 12,91 MPa y 20 MPa (Figura 21).

3.2.3 Resistencia a la compresión paralela a las fibras

Tabla 11: Modulo de rotura en compresión paralela.

Descripción	Laminación Vertical	
	Grado A	Grado B
	(MPa)	(MPa)
Promedio	27,4	20,9
Valor máximo	45,1	29,1
Valor mínimo	17,1	10,4
Rango	28,0	18,7
Desviación estándar	4,7	3,7
Coefficiente de variación	17%	18%
Tamaño de la muestra	60	60
Valor percentil 5%	20,8	15,0

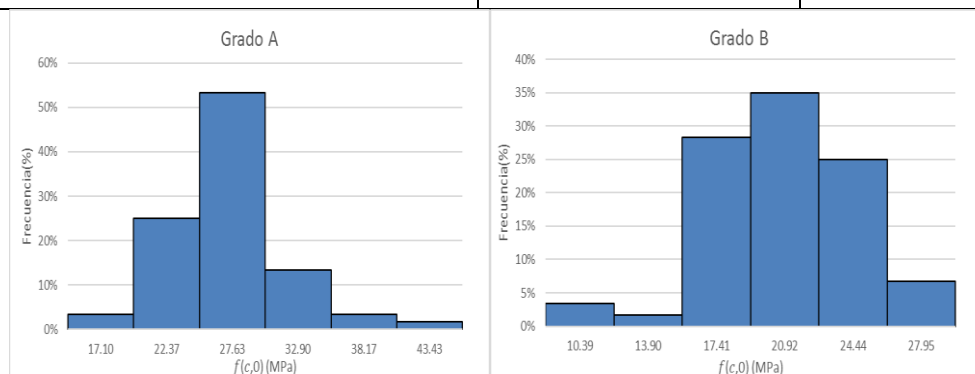


Figura 23: Histograma de tensión de rotura en compresión paralela laminación vertical grados A y B.

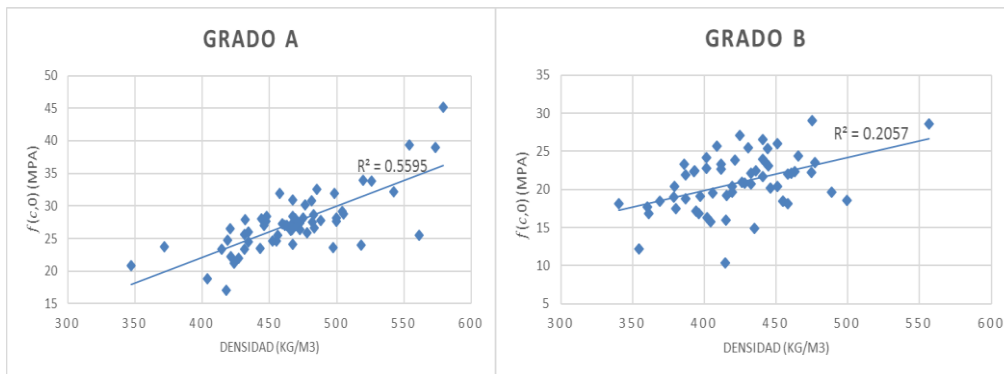


Figura 24: Correlación entre densidad y tensión de rotura en compresión paralela laminación vertical grados A y B.

En tanto la resistencia a la compresión paralela presenta valores promedio entre 27,4 MPa y 20,9 MPa con coeficientes de variación de 17% y 18% (Tabla 11). Además, el grado A presenta una tendencia entre 22,4 MPa y 32,9 MPa, mientras que el grado B entre 17,4 MPa y 24,4 MPa (Figura 23).

3.2.4 Resistencia al cizalle paralelo a la fibra

Tabla 12: Modulo de rotura en cizalle paralelo.

Descripción	Laminación Horizontal		Laminación Vertical	
	Grado A (MPa)	Grado B (MPa)	Grado A (MPa)	Grado B (MPa)
Promedio	8,1	6,8	5,4	4,4
Valor máximo	11,0	11,0	11,3	6,8
Valor mínimo	4,0	3,9	2,6	2,3
Rango	7,0	7,0	8,6	4,6
Desviación estándar	1,5	1,6	1,2	0,9
Coefficiente de variación	18%	24%	22%	22%
Tamaño de la muestra	60	60	58	60
Valor percentil 5%	4,5	4,3	3,4	2,6

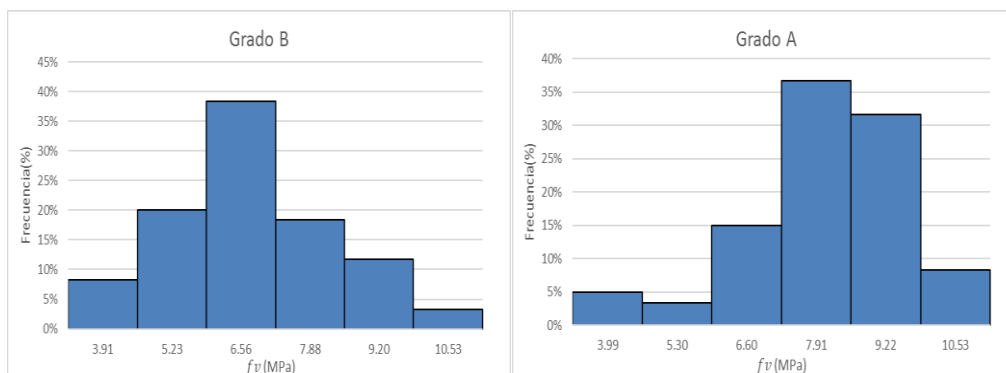


Figura 25: Histograma de tensión de rotura al cizalle laminación horizontal grados A y B.

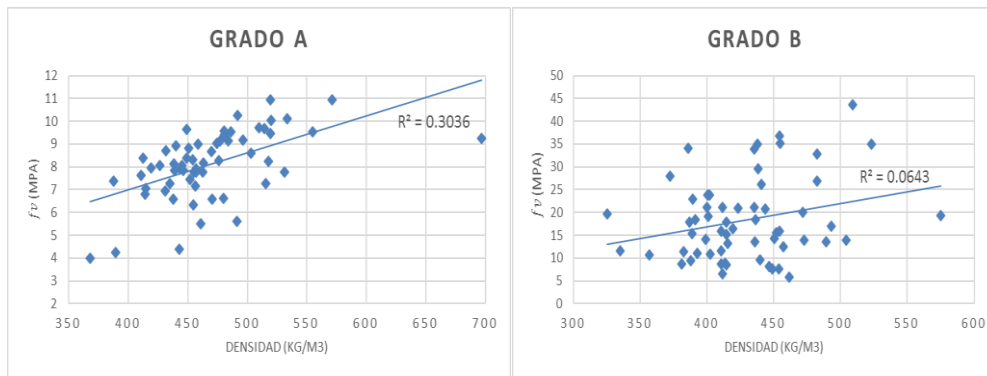


Figura 26: Correlación entre densidad y tensión de rotura al cizalle laminación horizontal grados A y B.

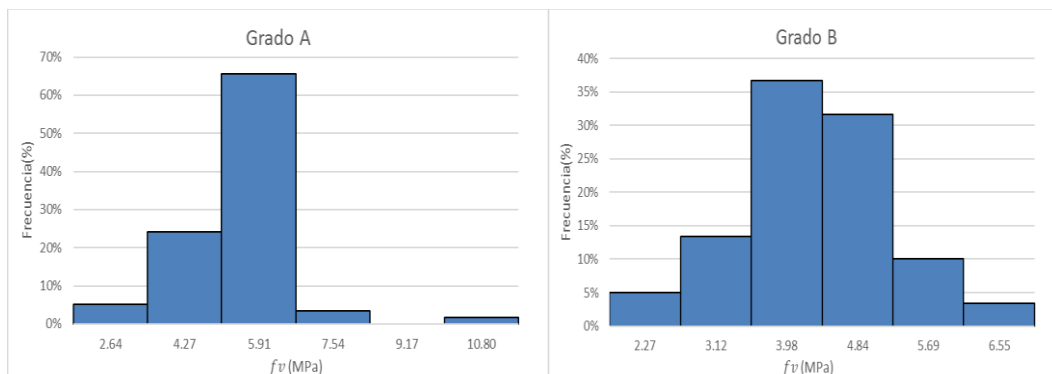


Figura 27: Histograma de tensión de rotura al cizalle laminación vertical grados A y B.

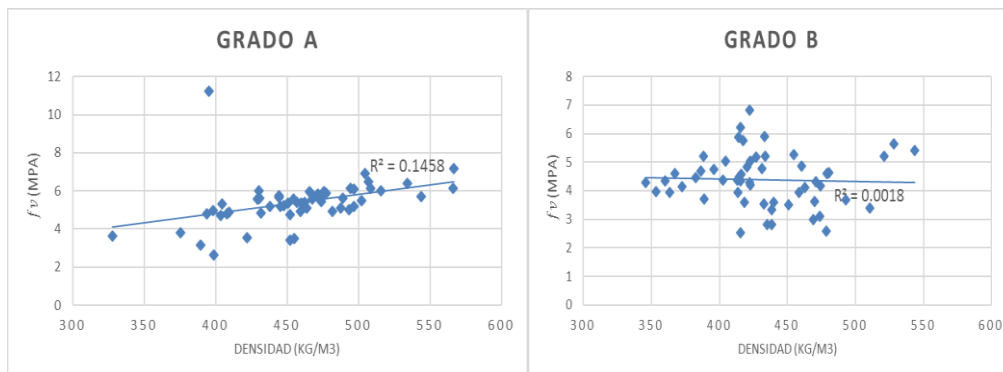


Figura 28: Correlación entre densidad y tensión de rotura al cizalle laminación vertical grados A y B.

Los valores promedio de la resistencia al cizalle fluctúan entre 8,1 MPa y 6,8 MPa, con variaciones entre 18% y 24% para laminación horizontal y entre 5,4 MPa y 4,4 MPa con variaciones iguales de 22% para laminación vertical (Tabla 12). Además, el grado A presenta una tendencia entre 6,6 MPa y 9,2 MPa para laminación horizontal y 4,3 MPa y 5,9 MPa para laminación vertical, mientras que el grado B presenta una tendencia entre 5,2 MPa y 7,9 MPa para laminación horizontal y 4 MPa y 4,8 MPa para laminación vertical (Figuras 25 y 27).

3.2.5 Densidad

Tabla 13: Densidad de la madera ensayada (12%).

Descripción	Grado A	Grado B
	(Kg / m ³)	(Kg / m ³)
Promedio	465,9	431,0
Valor máximo	697,0	612,2
Valor mínimo	327,8	325,1
Rango	369,1	287,1
Desviación estándar	45,8	45,4
Coefficiente de variación	10%	11%
Tamaño de la muestra	358	360

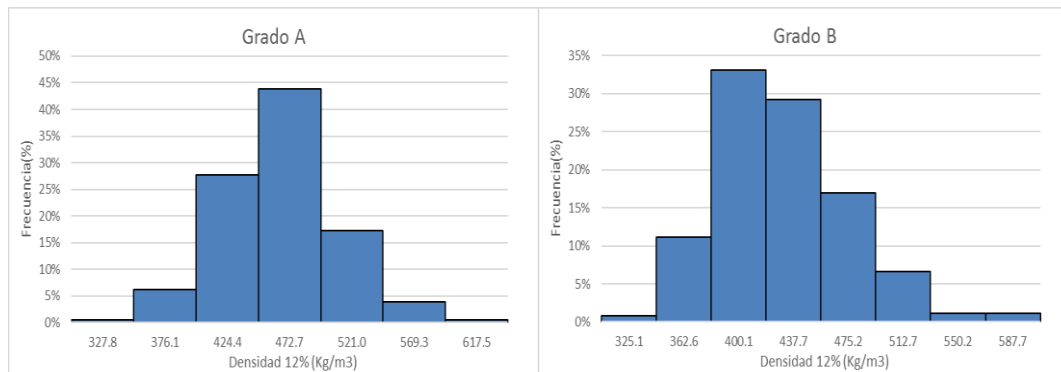


Figura 29: Histograma de Densidad con humedad al 12% grados A y B.

En cuanto a la relación entre densidad con un 12% de humedad y tensión de rotura, se observa una relación directa, es decir, mientras más densidad posee el material mayor será su resistencia como se puede observar en cada línea de tendencia. Esto se debe porque la densidad indica la cantidad de sustancia celular presente en una cantidad de volumen de madera, es decir mientras más pesada (densa) sea la madera mayor será su resistencia (Figuras 14, 16, 22, 24, 26 y 28). De igual forma se puede observar una relación directa entre módulo de rigidez y tensión de rotura en flexión, mientras mayor sea su rigidez mayor será la resistencia a la tensión de rotura (Figuras 18 y 20). (Díaz, 2005).

Se puede observar que no hay diferencias significativas en la densidad de la madera de pino radiata clasificada visualmente. En ambas su densidad promedio es cercana, 465,9 Kg/m³ para grado A y 431,0 Kg/m³ para grado B, con una variabilidad de 10% y 11% respectivamente (Tabla 13). Además, el grado A presenta una tendencia entre 424,4 Kg/m³ y 521 Kg/m³, mientras que el grado B entre 400,1 Kg/m³ y 475,2 Kg/m³ (Figura 29).

3.3 Tensiones Básicas Admisibles

Los valores básicos admisibles de resistencia a la tracción paralela, resistencia a la compresión paralela y resistencia en flexión, cizalle paralelo y módulo de elasticidad en flexión para laminación horizontal y vertical, obtenidos para los grados estructurales visuales A y B de pino radiata, según NCh3028/2 Of.2008 y los valores otorgados por la norma NCh2165 Of.1991 se observan en la tabla 15.

Tabla 15: Comparación tensiones básicas.

Grado	Laminación Horizontal			Laminación Vertical			Carga Axial	
	Flexión (MPa)	Cizalle (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Flexión (MPa)	Cizalle (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Compresión Paralela (MPa)	Tracción Paralela (MPa)
A	21,7	1,1	9.494,5	11,3	0,8	10.500,4	11,0	8,0
A*	19,0	1,3	11.000	19,0	1,08	10.000	13,0	9,3
B	14,5	1,0	8.042,2	6,4	0,6	8.949,2	7,9	3,6
B*	19,0	1,3	9.000	14,0	1,08	8.000	13,0	6,3

Los valores en * corresponden a las tensiones básicas según NCh2165 Of.1991.

Se puede observar que, para laminación horizontal la resistencia en flexión aumento solo en el grado A un 14%, mientras que en el grado B disminuyo un 23,7%. En cuanto a la laminación vertical, ambos grados disminuyeron su resistencia en flexión, un 41% en grado A y 54% en grado B. El módulo de elasticidad se vio aumentado en laminación vertical un 5% en grado A y 11,9% en grado B, no así en laminación horizontal donde disminuyo un 13,7% en grado A y 10,6% en grado B. En cuanto a la resistencia al cizalle para laminación horizontal, cizalle para laminación vertical, compresión paralela y tracción paralela las tensiones básicas no superaron a las estipuladas en la norma, con una baja de 15,4%, 25,9%, 15,4% y 14% en el grado A y un 23,1%, 44,4%, 39,2% y 42,9% en el grado B respectivamente.

4. CONCLUSIÓN.

Los resultados obtenidos de esta investigación demostraron que, las principales características para rechazar una pieza de madera destinada a la fabricación de elementos estructurales laminados encolados, utilizando los criterios de clasificación visual estipulados en la NCh2150 Of.1989, son arista faltante (34%) y alabeos (23%).

El grado A presenta una menor dispersión de datos que el grado B, esto se debe a que al realizar la clasificación visual el grado B presenta una mayor cantidad de defectos por lo que sus propiedades mecánicas se ven mayormente afectadas, además los coeficientes de determinación (R^2) en el grado A prácticamente siempre es mayor al del grado B en cada tipo de ensayo, demostrando que existe una mejor correlación de las variables en el grado A que en el grado B.

Finalmente se observó que las tensiones básicas admisibles mencionadas en la NCh2165 Of.1991, la resistencia a flexión para laminación horizontal en los grados A y B corresponden al mismo valor, de igual forma se ve para la tensión de cizalle y compresión paralela. Sin embargo, los resultados indican que la resistencia del grado A es mayor que el grado B en cada tipo de solicitud. Además, prácticamente todas las propiedades obtenidas corresponden a un valor menor a la estipulada por la norma. Esto se debe principalmente a la metodología utilizada en la época y cabe destacar que el tamaño de la muestra es limitado, es decir solo proporciona información de madera proveniente de la 8° región, por lo que estos resultados estimulan a estudios complementarios que consideren madera crecida en otros sitios del país y amplíen la cantidad de variables analizadas.

5. REFERENCIAS.

1. Díaz, P. (2005). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Memoria de pregrado. Universidad de Talca.
2. INN Instituto de normalización nacional (1988). NCh 176/2 Of. 86: Determinación de la densidad.
3. INN Instituto de normalización nacional (2006). NCh 3028/1 Of. 2006: Madera estructural: Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte I: Métodos de ensayo en tamaño estructural.
4. INN Instituto de normalización nacional (2008). NCh 3028/2 Of. 2008: Madera estructural: Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia. Parte II: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural.
5. INN Instituto de normalización nacional (1985). NCh 174 Of. 1985: Maderas – Unidades empleadas, dimensiones nominales, tolerancias y especificaciones.
6. INN, 1989 Mod. 1991. NCh 2150: Madera Laminada Encolada – Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de Pino radiata. Instituto de Normalización Nacional, Chile.
7. INN, 1991. NCh 2165: Tensiones admisibles para la madera laminada encolada estructural de Pino radiata. Instituto de Normalización Nacional, Chile.
8. INSTITUTO FORESTAL (2010), Informe técnico N°178: Propiedades de las maderas de especies forestales nativas y exóticas en Chile, Chile.
9. INSTITUTO FORESTAL (2016), boletín estadístico N°154: Anuario forestal 2016, Chile.
10. INSTITUTO FORESTAL (2016), boletín estadístico N°155: La industria del aserrío 2016, Chile.
11. INSTITUTO FORESTAL (2015), Informe técnico N°203: Grados estructurales de la madera aserrada clasificada visualmente, Chile.
12. González, M. (2013). Bases de un sistema de certificación de madera para uso estructural en Chile. Memoria de postgrado. Universidad del Bío-Bío.