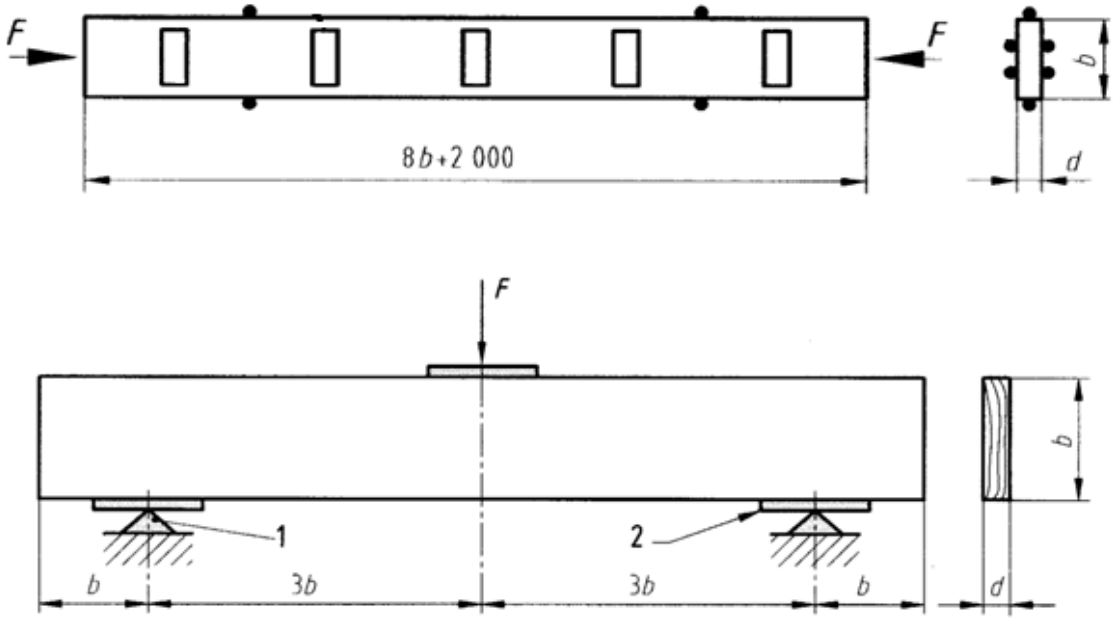
Informe Técnico N° 203

GRADOS ESTRUCTURALES DE LA MADERA ASERRADA DE LENGA CLASIFICADA VISUALMENTE



INSTITUTO FORESTAL
2015

Ministerio de Agricultura
Gobierno de Chile

INFOR

Informe Técnico N° 203

INSTITUTO FORESTAL
AREA DE TECNOLOGIA Y PRODUCTOS DE LA MADERA

GRADOS ESTRUCTURALES DE LA MADERA ASERRADA DE LENGA CLASIFICADA VISUALMENTE

Autores
Luis Vásquez V.[1]
Gonzalo Hernández C.[2]
Raúl Campos P.[3]
Patricio Elgueta M. [4]
Marcelo González R.[5]

[1] Instituto Forestal. luis.vasquez@infor.cl
[2] Instituto Forestal. gonzalo.hernandez@infor.cl
[3] Instituto Forestal. raul.campos@infor.cl
[4] Instituto Forestal. patricio.elgueta@infor.cl
[5] Instituto Forestal. marcelo.gonzalez@infor.cl



INSTITUTO FORESTAL - Chile 2015
Grados Estructurales de la Madera Aserrada de Lenga Clasificada Visualmente
Informe Técnico N° 203
Área de Tecnología y Productos de la Madera, INFOR, Sede Bio Bio.
Estudio financiado por el Contrato de Desempeño INFOR-MINAGRI 2015.

www.infor.cl
www.construccionenmadera.cl

.

PRÓLOGO

La especie forestal Lenga (*Nothofagus pumilio)* es una latifoliada nativa del sur de Chile, que crece en la cordillera de los Andes, distribuyéndose entre la región del Maule y la región del Magallanes y la Antártica chilena. La superficie de bosques naturales de Lenga asciende a 3,62 millones de hectáreas, la cual se concentra en un 75% en las regiones de Aysén y Magallanes.

El año 2014 la producción anual de madera aserrada de Lenga llegó a los 43.600 m^3, correspondiente a un 33% de la producción total nacional de madera aserrada de especies nativas, siendo la especie de mayor producción.

El presente estudio permitió caracterizar la madera aserrada de Lenga destinada a usos estructurales, mediante una clasificación visual y ensayos físicos, mecánicos realizados por el Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR); laboratorio que cuenta con la acreditación de su sistema de gestión basado en la norma ISO 17025, lo que permite el reconocimiento de sus resultados a nivel nacional e internacional.

La publicación “Grados estructurales de madera aserrada de Lenga clasificada visualmente”, fue financiada con recursos provenientes de convenio 2015, suscrito entre el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y el Instituto Forestal (INFOR).

Participaron en este estudio los profesionales y técnicos del Área de Tecnología y Productos de la Madera del INFOR Srs. Luís Vásquez Valenzuela, Gonzalo Hernández Careaga, Patricio Elgueta Muñoz, Raúl Campos Pous, y Marcelo González Retamal.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
2. METODOLOGÍA 2
2.1 Madera 2
2.2 Clasificación visual 2
2.3 Ensayos físicos y mecánicos 5
2.3.1 Resistencia y rigidez en flexión 5
2.3.2 Resistencia a la tracción paralela a las fibras 7
2.3.3 Resistencia a la compresión paralela a las fibras 8
2.3.4 Resistencia al cizalle paralelo a las fibras 10
2.3.4 Densidad 11
2.4 Determinación de los valores admisibles 12
3. RESULTADOS 16
3.1 Clasificación visual estructural 16
3.2 Ensayos físicos y mecánicos 19
3.3 Valores admisibles 26
4. CONCLUSIONES 29
5. REFERENCIAS 30
6. ANEXOS 31

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación estructural de madera consiste en la técnica mediante la cual las piezas de madera se agrupan según su capacidad para resistir cargas o esfuerzos. Este agrupamiento proporciona al usurario la confianza de esperar un valor mínimo de resistencia para las piezas de un determinado grupo o grado estructural, cualquiera sea el 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 una serie de características de la madera, como nudos, inclinación de la fibra, grietas, alabeos, etc. Esta clasificación visual debe ser realizada por *clasificadores*, que corresponde a personal calificado y 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 un método de clasificación visual estructural de madera aserrada de Lenga, junto con la determinación de valores admisibles provenientes de ensayos físicos y mecánicos en piezas de tamaño comercial. La madera utilizada fue obtenida a través de la empresa Ignisterra S.A., proveniente de Tierra del Fuego, región de Magallanes y la antártica chilena.

La metodología empleada, para la clasificación visual, los ensayos mecánicos y el análisis de los datos están de acuerdo a la normativa chilena vigente.

2. METODOLOGÍA

2.1 Madera

La madera de Lenga (*Nothofagus pumilio*) utilizada en el presente estudio proviene del bosque de 15.000 hectáreas perteneciente a Forestal Russfin, ubicado en Tierra del Fuego, región de Magallanes y la Antártica chilena. La muestra de madera cepillada seca se obtuvo de la planta manufacturera de la empresa Ignisterra S.A. ubicada en Villa Alemana, región de Valparaíso.

2.2 Clasificación visual

La norma chilena NCh 1970/1 establece los requisitos que debe cumplir la madera aserrada o cepillada proveniente de especies latifoliadas, destinada a un uso estructural y que se clasifica mediante un procedimiento visual. Se establecen requisitos que debe cumplir la madera cualquiera sea su contenido de humedad; no obstante, su empleo más eficiente se logra con un contenido de humedad equivalente a la humedad de equilibrio del lugar en que se utilice, justificándose el uso de madera verde sólo por razones técnicas de servicio o por la dificultades que involucre el proceso de secado de ciertas especies madereras.

La norma señala cuatro grados de calidad, identificados como: grado estructural N°1, grado estructural N°2, grado estructural N°3 y grado estructural N°4; los cuales se obtienen a través de límites admisibles para las características de la madera de coníferas, tales como tamaño de nudos, tamaño de grietas y rajaduras, presencia de médula, bolsas de quino, albeos, etc. Dichos límites admisibles para cada grado visual se resumen en la tabla 2.1.

Para este estudio, los cuatro grados estructurales que establece la norma NCh 1970/1, se agruparon en dos calidades:

- Grado 2 y mejor (N°2+): Piezas que cumplen los requisitos de calidad establecidos para los grados N°1 y N°2.

- Grado 4 y mejor (N°4+): Piezas que cumplen los requisitos de calidad establecidos para los grados N°3 y N°4.

La clasificación visual de la madera aserrada se desarrolló según las indicaciones de la norma NCh 1970/1, siendo realizada por clasificadores del Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR).

Tabla 2.1: Límites admisibles para los grados estructurales visuales de especies latifoliadas

Tipo de característica	Grado estructural N°1	Grado estructural N°2	Grado estructural N°3	Grado estructural N°4
Generales	Cada pieza debe estar correctamente aserrada de modo que superficies adyacentes sean ortogonales entre sí, cumplir con las tolerancias especificadas y tener los extremos despuntados con un corte normal al eje de la pieza.			
Nudos, incluye cortes de ramas, orificios por nudos y orificios que no sean por insectos				
	Que no exceda W/7 en la cara o T/7 en el canto	Que no exceda W/4 en la cara o T/4 en el canto	Que no exceda W/3 en la cara o T/3 en el canto	Que no exceda 3W/8 en la cara o 3 T/8 en el canto
Orificio de barrenadores no asociados con descomposición				
Diámetros menor o igual a 3mm	Que no exceda los 12 orificios por 100x100mm	Que no exceda los 20 orificios en 100x100mm	Ilimitado si la separación es al menos dos veces el diámetro	Ilimitado si la separación es al menos dos veces el diámetro
Diámetro sobre 3mm o donde hay separación menor a 2 x diámetro	Igual que para nudos	Igual que para nudos	Igual que para nudos	Igual que para nudos
Galería de termitas				
Cerradas	No permitidas	No permitidas	No permitidas	No permitidas
No cerradas	Igual que para pérdida de madera y canto muerto	Igual que para pérdida de madera y canto muerto	Igual que para pérdida de madera y canto muerto	Igual que para pérdida de madera y canto muerto
Fibra levantada				
Todas las especies	Que no exceda 1 en 15	Que no exceda 1 en 10	Que no exceda 1 en 8	Que no exceda 1 en 6
Médula y partiduras en médula				
Dimensiones menores inferiores a 175mm	No permitido	No permitido	No permitido	No permitido
Dimensiones menores a 175mm o más	Permitido si está dentro del tercio medio de W y T	Permitido si está dentro del tercio medio de W y T	Permitido si está dentro del tercio medio de W y T	Permitido si está dentro del tercio medio de W y T
Para especies listadas en la Tabla A5, Apéndice A	Que no exceda 1/20 del área de la sección transversal	Que no exceda 1/9 del área de la sección transversal	Que no exceda 1/6 del área de la sección transversal	Que no exceda 1/3 del área de la sección transversal
Bolsas de goma (quino)				
Largo adicional	Que no exceda 3L/2	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Largo individual				
No de una superficie a otra	Que no exceda L/2			
De una superficie a otra	Que no exceda L/4			

Tipo de característica	Grado estructural N°1	Grado estructural N°2	Grado estructural N°3	Grado estructural N°4
Bolsillos de goma, bolsillos de látex, bolsillos de resina ; sobre crecimiento de daños				
Una superficie a otra e intersección al extremo	Igual a partiduras en los extremos	Igual a partiduras en los extremos	Igual a partiduras en los extremos	Igual a partiduras en los extremos
De lo contrario				
Largo individual no excede (menos de)	3W o 30mm	3W o 30mm	3W o 30 mm	3W o 30 mm
Ancho individual (medido radialmente)				
Sólo una superficie	Que no exceda 12mm o 1/4 de las superficie en la que se produce	Que no exceda 20mm o 1/3 de las superficie en la que se produce	Que no exceda 25mm o 1/2de las superficie en la que se produce	Que no exceda 30mm o 1/2de las superficie en la que se produce
Una superficie a otra	Que no exceda 6mm o 1/8 de las superficie en la que se produce	Que no exceda 12mm o 1/4 de las superficie en la que se produce	Que no exceda 20mm o 1/3 de las superficie en la que se produce	Que no exceda 25mm o 1/3 de las superficie en la que se produce
Partiduras en los extremos				
Largo adicional	Que no exceda W o 100mm	Que no exceda W o 100mm	Que no exceda 3W2 o 150mm	Que no exceda W o 150mm
Grietas que no sean internas				
Ancho	Que no exceda 3mm	Que no exceda 3mm	Que no exceda 3mm	Que no exceda 3mm
Largo individual	Que no exceda L/4	Que no exceda L/3	Que no exceda L/2	Que no exceda L/2
Descomposición primaria				
Profundidad	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm
Adicional en cualquier área de 2 m de largo	Que no exceda los 150 x 100mm	Que no exceda los 150 x 100mm	Que no exceda los 150 x 100mm	Que no exceda los 150 x 100mm
Duramen susceptible a pérdida de fibra, canto muerto				
	Que no exceda 1/10 del área transversal	Que no exceda 1/5 del área transversal	Que no exceda 1/5 del área transversal	Que no exceda 1/5 del área transversal
	Que no exceda W/2 en la cara o T/3 en el canto	Que no exceda W/2 en la cara o T/3 en el canto	Que no exceda W/2 en la cara o T/3 en el canto	Que no exceda W/2 en la cara o T/3 en el canto
Mal cepillado, que excede los límites de pérdida de fibra y canto muerto				
Profundidad	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm	Que no exceda los 3 mm
Largos individuales	Que no exceda los 600 mm	Que no exceda los 600 mm	Que no exceda los 600 mm	Que no exceda los 600 mm
Encorvadura y torcedura (Ver tablas 2, 3, 4 y 5. NCh 1970/1)				
Acanaladura				
	Que no exceda 1 mm por cada 50mm de W	Que no exceda 1 mm por cada 50mm de W	Que no exceda 1 mm por cada 50mm de W	Que no exceda 1 mm por cada 50mm de W

Nota: L = largo; W = ancho; T = espesor
Fuente: NCh 1970/1

2.3 Ensayos físicos y mecánicos

Se realizaron ensayos mecánicos de madera cepillada de Lenga bajo diferentes disposiciones de carga, como son la resistencia y rigidez en flexión, resistencia a la tracción paralela a las fibras, la resistencia a la compresión paralela a las fibras, y la resistencia al cizalle paralelo. 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 (LME-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

2.3.1 Resistencia y rigidez en flexión

El esquema de ensayo de resistencia y rigidez en flexión se muestra en la figura 2.1. 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 2.2 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 como sigue:

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

Donde,

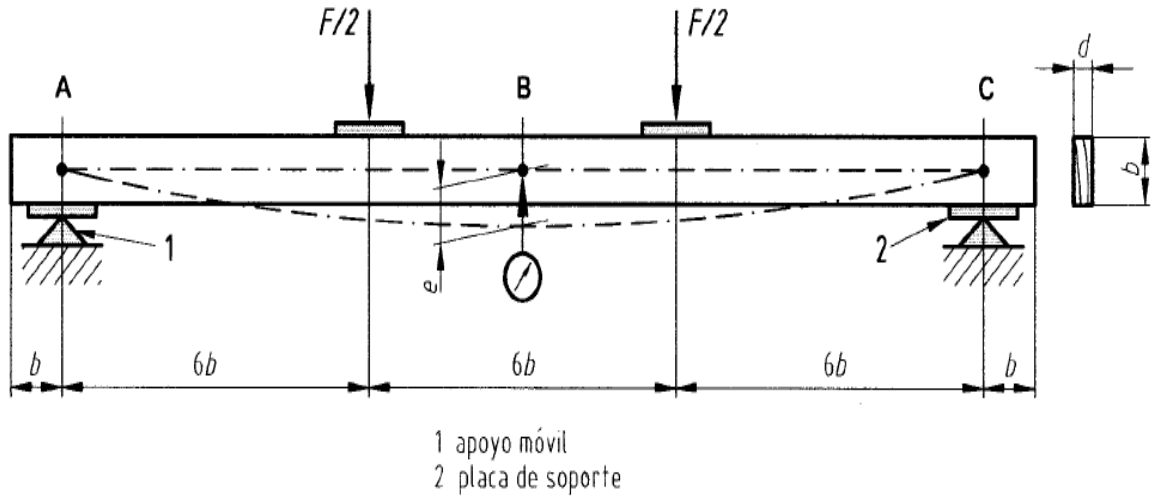
E : Módulo de elasticidad en flexión
L : Luz de la pieza de madera entre apoyos
d : Espesor de la pieza de madera
b : Ancho de la pieza de madera
$\left(\frac{\Delta F}{\Delta e}\right)$: Pendiente de la recta, prolongada del rango elástico de la curva carga-desplazamiento, que se forma de los datos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

$$f_m = \frac{F_{máx} L}{b d^2}$$

Donde,

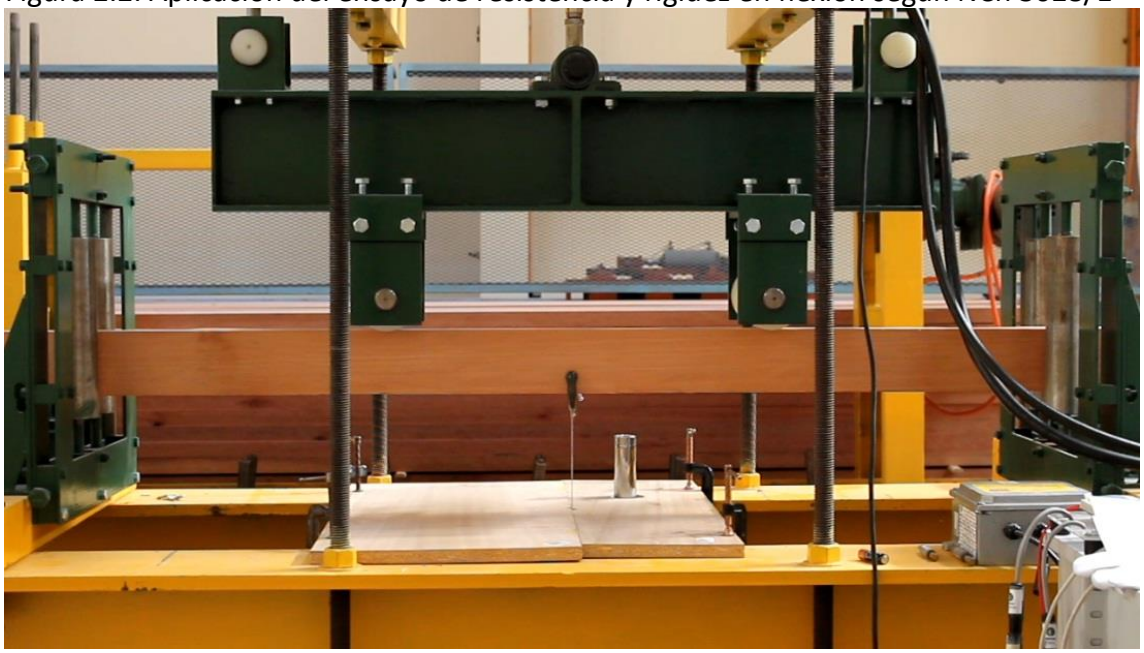
f_m : Resistencia en flexión
$F_{máx}$: Valor de la carga aplicada en la falla o carga máxima

Figura 2.1: Esquema de ensayo de resistencia y rigidez en flexión



Fuente: NCh 3028/1

Figura 2.2: Aplicación del ensayo de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/1



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

2.3.2 Resistencia a la tracción paralela a las fibras

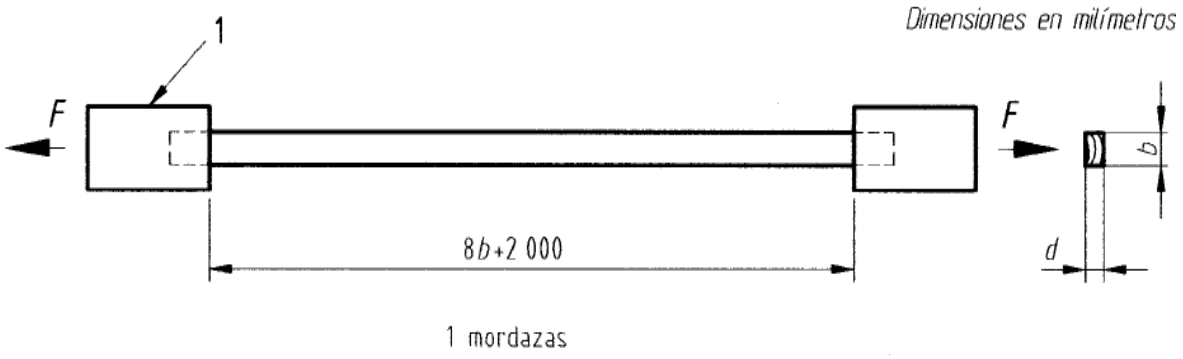
El esquema de carga aplicada en el ensayo de tracción paralela a las fibras se ilustra en la figura 2.3. La longitud (L) de la pieza de madera entre las mordazas debe ser de 2.000 milímetros más 8 veces el ancho (b) de la probeta, la cual se debe cargar hasta la falla. En la figura 2.4 se observa la aplicación de un ensayo de tracción paralela.

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

$$f_{t,0} = \frac{F_{máx}}{bd}$$

Donde,
$f_{t,0}$: Resistencia a la tracción paralela a las fibras
$F_{máx}$: 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 2.3: Esquema de ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras.



Fuente: NCh 3028/1

Figura 2.4: Aplicación de un ensayo de resistencia a la tracción paralela a las fibras



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

2.3.3 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 2.5. 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 2.6 se observa la aplicación de un ensayo de compresión paralela, donde se puede apreciar la zona de carga y los dispositivos de fijación lateral.

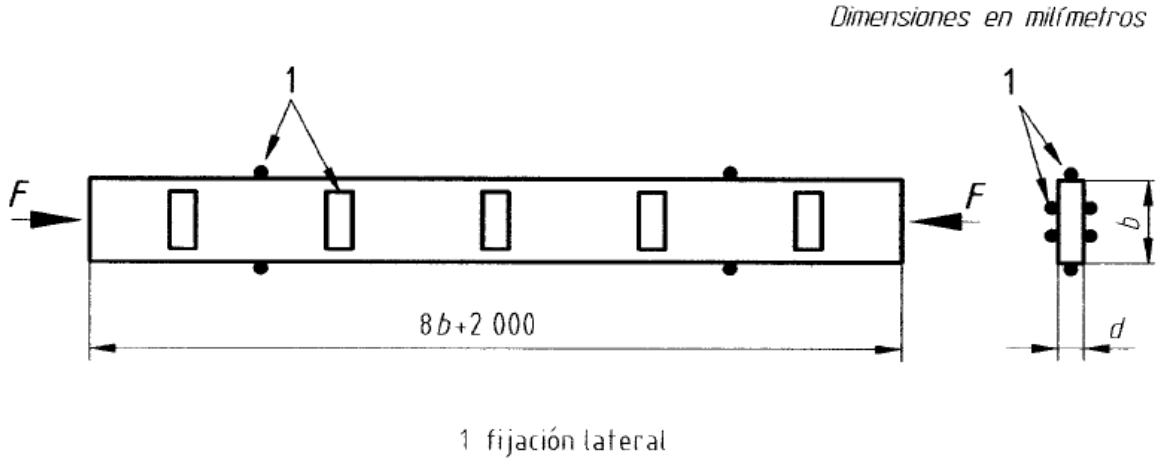
La resistencia a la compresión paralela $(f_{c,0})$ se calcula como sigue:

$$f_{c,0} = \frac{F_{máx}}{bd}$$

Donde,

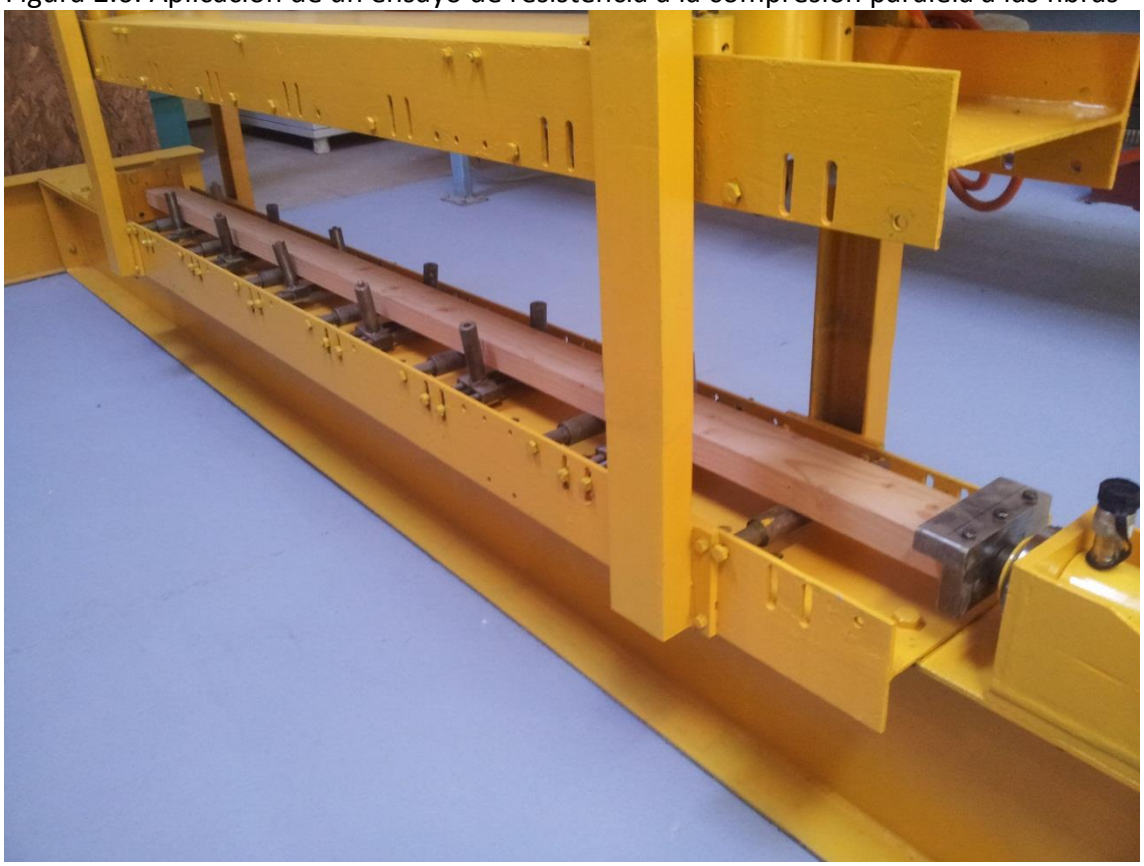
$f_{c,0}$: Resistencia a la compresión paralela a las fibras
$F_{máx}$: Valor de la carga aplicada en la falla o carga máxima
d : Espesor de la pieza de madera
b : Ancho de la pieza de madera

Figura 2.5: Esquema de ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras.



Fuente: NCh 3028/1

Figura 2.6: Aplicación de un ensayo de resistencia a la compresión paralela a las fibras



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

2.3.4 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 2.7. La pieza de madera debe tener una longitud total 8 veces el ancho (b) de la probeta, y la luz de ensayo es de 6 veces el ancho (b); esta se debe ser sometida a una carga central puntual hasta que se produzca la falla. En la figura 2.8 se observa la aplicación de un ensayo de cizalle paralelo.

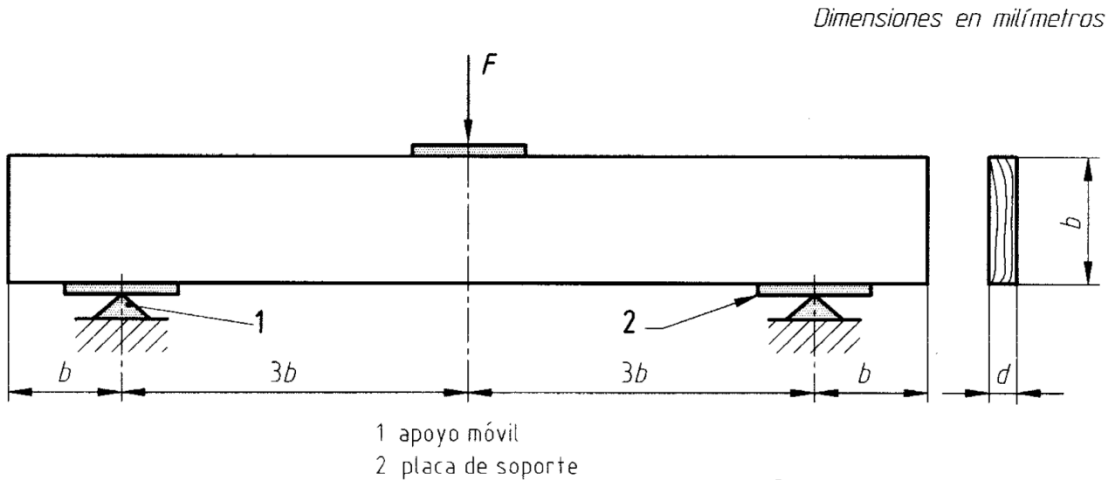
La resistencia a la cizalle paralelo (f_v) se calcula como sigue:

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

Donde,

$\mathrm{f_v}$: Resistencia al cizalle paralelo a las fibras
$F_{máx}$: 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 2.7: Esquema de ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras.



Fuente: NCh 3028/1

Figura 2.8: Aplicación de un ensayo de resistencia al cizalle paralelo a las fibras.



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

2.3.4 Densidad

Las probetas para determinar la densidad de las piezas de madera ensayadas, deben incluir la sección transversal completa y tener una longitud de por lo menos el 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 como sigue:

$$\rho_e = \frac{m}{bdL}$$

En tanto la densidad al 12% de humedad (ρ_{12}) se debe calcular como sigue:

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

Donde,

ρ_e : Densidad de ensayo
ρ_{12} : Densidad al 12% de humedad
d : Espesor de la pieza de madera
b : Ancho de la pieza de madera
L : Largo de la probeta de madera para densidad
H : Humedad de la madera al momento del ensayo

2.4 Determinación de los valores admisibles

La determinación de los valores admisibles para los grados estructurales visuales de Lenga, se determinaron según el análisis estadístico y especificaciones de la norma chilena *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.*

La norma *chilena 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 de tamaño estructural*, especifica los procedimientos de muestreo y evaluación de la propiedades de poblaciones específicas de madera aserrada de tamaño estructural clasificada por su resistencia. Esta norma también 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 NCh 3028/1 deben ser ajustados a las siguientes condiciones:

- Contenido de humedad único, que generalmente es de un 12%. Las fórmulas de ajuste para el módulo de rotura en flexión, la resistencia a la tracción paralela y la resistencia a la compresión paralela son:

$P_2 = \mathrm{P}_1$; Para valores de módulo de rotura en flexión $\leq$ 16,6 MPa; resistencia a la tracción paralela $\leq$ 21,7 MPa; y resistencia a la compresión paralela $\leq$ 9,65 MPa.

$P_2 = \mathrm{P}_1 + \left\{\frac{(\mathrm{P}_1 - \mathrm{B}_1)}{(\mathrm{B}_2 - \mathrm{H}_1)}\right\}(\mathrm{H}_1 - \mathrm{H}_2)$; Para valores de módulo de rotura en flexión >16,6 MPa; resistencia a la tracción paralela $>$ 21,7 MPa; y resistencia a la compresión paralela $>$ 9,65 MPa.

Donde,

P_1 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 1
P_2 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 2
H_1 : Contenido de humedad 1, expresado en [%]
H_2 : Contenido de humedad 2, expresado en [%]
B_1, B_2 : Constantes según tabla 2.3

Tabla 2.3: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para resistencia en flexión, tracción paralela y compresión paralela

Constantes	Resistencia en flexión	Resistencia en tracción paralela	Resistencia en compresión paralela
B_1	16,65	21,72	9,65
B_2	40	80	34

Fuente: NCh 3028/2

La fórmula de ajuste para el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia al cizalle paralelo a la fibra es:

$$P_2 = \mathrm{P}_1 \frac{[B_1 - (B_2\ H_2)]}{[B_1 - (B_2\ H_1)]}$$

Donde,

P_1 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 1
P_2 : Valor de la propiedad al contenido de humedad 2
H_1 : Contenido de humedad 1, expresado en [%]
H_2 : Contenido de humedad 2, expresado en [%]
$B_{1,}\ B_2$: Constantes según tabla 2.4

Tabla 2.4: Constantes para el ajuste de contenido de humedad para elasticidad en flexión

Constantes	Elasticidad en flexión	Resistencia al cizalle paralelo
B_1	1,857	1,33
B_2	0,0237	0,0167

Fuente: NCh 3028/2

La validez de las fórmulas de ajuste por contenido de humedad, se restringe a un rango de 10% a 23%. Para valores inferiores o superiores a los límites, se deben considerar estos últimos en las fórmulas.

- Estandarización del módulo de elasticidad, para que refleje las condiciones de uso previstas para el material (relación luz/profundidad y configuración de carga). Para determinar el módulo de elasticidad aparente, se debe resolver la siguiente expresión:

$$E_{ai2} = \frac{1+K_1\left(h_1/L_1\right)^2\left(E/G\right)}{1+K_2\left(h_2/L_2\right)^2\left(E/G\right)} E_{ai}$$

Donde,

E_{ai2} : Módulo de elasticidad aparente
E_{ai} : Módulo de elasticidad de ensayo
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 cortante
G : Módulo de rigidez
K_i : Factor de ajuste del módulo de elasticidad aparente, según tabla 2.5

Tabla 2.5: Factores de ajuste para el módulo de elasticidad aparente

Carga	Lugar de medición de la deflexión	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	1,200
Uniformemente distribuida	Mitad del tramo	0,960

Fuente: NCh 3028/2

- Ajuste de los datos experimentales mediante factores de reducción, que incluyen factores de seguridad y el efecto de duración acumulada de carga de 10 años según la propiedad considerada (ver tabla 2.6).

Tabla 2.6: Factores de reducción para relacionar estadísticas experimentales con la 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: NCh 3028/2

El método no paramétrico establece que se debe estimar el punto porcentual no paramétrico de la muestra (EPN) mediante interpolación. El proceso se lleva a cabo ordenando los valores experimentales en forma ascendente y calculando, a partir de la menor resistencia, para cada valor la expresión: i / (n+1), hasta verificar que:

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

Donde,

i : Ordinal del valor
k : nivel de exclusión o percentil considerado
n : tamaño de la muestra

El valor correspondiente al percentil considerado se le asignará el ordinal "j", interpolándose el estimador porcentual de punto no paramétrico mediante la expresión:

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

Para el caso del módulo de elasticidad y compresión normal a las fibras, se debe tomar el valor promedio de la muestra.

3. RESULTADOS

3.1 Clasificación visual estructural

Se obtuvieron 522 piezas en grado N°2+ y 268 piezas en grado N°4+. La madera de Lenga correspondió a piezas cepilladas de escuadría 45x90 (2x4) de 3,2 m, 3,6 m y 4,0 m de largo, en estado seco (humedad bajo el 19%). Cada pieza de madera se clasificó por la norma NCh 1970/1.

En las figuras 3.1 a 3.3 se observa algunas de las característica de la madera que se consideraron en la clasificación visual: nudos, bolsillos de corteza, y grietas, respectivamente. En tanto, la figura 3.4 expone la apariencia de la madera clasificada bajo la norma NCh 1970/1.

Figura 3.1: medición de nudo en la cara en madera de Lenga



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

Figura 3.2: Medición de bolsillo de corteza en madera de Lenga



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

Figura 3.3: Grietas en madera de Lenga



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

Figura 3.4: Apariencia de los grados visuales estructurales de Lenga



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

3.2 Ensayos físicos y mecánicos

Las 790 piezas de Lenga clasificadas en los grados N°2+ y N°4+, según norma NCh 1970/1, se utilizaron para realizar los ensayos físicos y mecánicos según la distribución que aparece en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Cantidad de piezas en grados NCh 1207 por tipo de ensayo

Tipo de ensayo	Grado N°2+	Grado N°4+	Total
Flexión	131	67	**198**
Tracción paralela	131	66	**197**
Compresión paralela	130	68	**198**
Cizalle paralelo	130	67	**197**
Total	**522**	**268**	**790**

Las tablas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, y 3.6 muestran la estadística descriptiva de los resultados de los ensayos de resistencia en flexión, rigidez en flexión, resistencia a la tracción paralela, resistencia a la compresión paralela y resistencia al cizalle paralelo. En todas las propiedades se observa una tendencia clara de una mayor resistencia o rigidez promedio al mejorar la calidad del grado estructural bajo norma NCh 1970/1.

Para el caso de la resistencia en flexión se observaron valores promedio que fluctuaron entre 52 MPa y 61,4 MPa, con variaciones entre 27% y 33% (tabla 3.2). La rigidez en flexión presentó valores promedio que se movieron entre valores cercanos a 11.056 MPa y 11.085 MPa, con variaciones similares de 12% y 15% (tabla 3.3). En tanto, la resistencia a la tracción paralela presentó promedios entre 28,2 MPa y 37,9 MPa, con coeficientes de variación de 32% y 41% respectivamente (tabla 3.4). La resistencia a la compresión paralela obtuvo valores promedio entre 30,2 MPa y 33,4 MPa, con variaciones entre el 20% y el 27% (tabla 3.5). Finalmente la resistencia al cizalle paralelo presentó promedios entre 6,0 MPa y 6,6 MPa, con variaciones entre 25% y 33% (tabla 3.6).

En todas las propiedades mecánicas, se evidenció que el grado N°4+ siempre presentó una variabilidad mayor que el grado de calidad N°2+.

En cuanto a la densidad, los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 3.7, donde se puede apreciar que no hay diferencias significativas en la densidad de la madera de Lenga clasificada visualmente, según grado estructural. El valor promedio en ambas calidades fue cercano a los 590 kg/m3, con una variabilidad del 7%.

Finalmente, en relación a los tipos de falla, el ensayo de flexión evidenció fallas típicas por tracción en las fibras inferiores de las vigas y compresión en las fibras sobre el eje neutro (figura 3.5). En los ensayos de tracción paralela se observaron fallas en las fibras por tracción pura (figura 3.6). En los ensayos de compresión paralela se observó la compresión de las fibras sin efectos de pandeo (figura 3.7). Finalmente, en los ensayos de cizalle paralelo se observó la falla inducida por corte paralelo a las fibras de la madera (figura 3.8).

Tabla 3.2: Resistencia a la flexión, por grado estructural, de madera de Lenga a un 12% de humedad

Descripción	**MORf,12% N°2+ (NCh1970/1)**	**MORf,12% N°4+ (NCh 1970/1)**
Promedio [MPa]	61,4	52,0
valor mínimo [MPa]	16,8	7,7
valor máximo [MPa]	95,2	91,9
rango [MPa]	78,3	84,2
desviación estandar [MPa]	16,4	17,3
Coeficiente de variación	27%	33%
tamaño muestra	131	67

Tabla 3.3: Rigidez en flexión, por grado estructural, de madera de Lenga a un 12% de humedad

Descripción	**Ef,12% N°2+ (NCh1970/1)**	**Ef,12% N°4+ (NCh 1970/1)**
Promedio [MPa]	11.056	11.085
valor mínimo [MPa]	7.178	7.880
valor máximo [MPa]	15.021	14.546
rango [MPa]	7.843	6.667
desviación estandar [MPa]	1.313	1.652
Coeficiente de variación	12%	15%
tamaño muestra	131	67

Tabla 3.4: Resistencia en tracción paralela, por grado estructural, de madera de Lenga a un 12% de humedad

Descripción	Rtp,12% N°2+ (NCh 1970/1)	Rtp,12% N°4+ (NCh1970/1)
Promedio [MPa]	37,9	28,2
valor mínimo [MPa]	12,1	4,3
valor máximo [MPa]	64,1	66,6
rango [MPa]	52,0	62,3
desviación estandar [MPa]	12,1	11,6
Coeficiente de variación	32%	41%
tamaño muestra	131	66

Tabla 3.5: Resistencia en compresión paralela, por grado estructural, de madera de Lenga a un 12% de humedad

Descripción	Rcp,12% N°2+ (NCh1970/1)	Rcp,12% N°4+ (NCh 1970/1)
Promedio [MPa]	33,4	30,2
valor mínimo [MPa]	12,7	5,1
valor máximo [MPa]	49,8	44,6
rango [MPa]	37,1	39,5
desviación estandar [MPa]	6,6	8,0
Coeficiente de variación	20%	27%
tamaño muestra	130	68

Tabla 3.6: Resistencia al cizalle paralelo, por grado estructural, de madera de Lenga a un 12% de humedad

Descripción	Rcz,12% N°2+ (NCh1970/1)	Rcz,12% N°4+ (NCh 1970/1)
Promedio [MPa]	6,6	6,0
valor mínimo [MPa]	2,2	2,2
valor máximo [MPa]	10,6	10,5
rango [MPa]	8,4	8,3
desviación estandar [MPa]	1,6	2,0
Coeficiente de variación	25%	33%
tamaño muestra	130	67

Tabla 3.7: Densidad de referencia al 12% de humedad, por grado estructural, de madera de Lenga

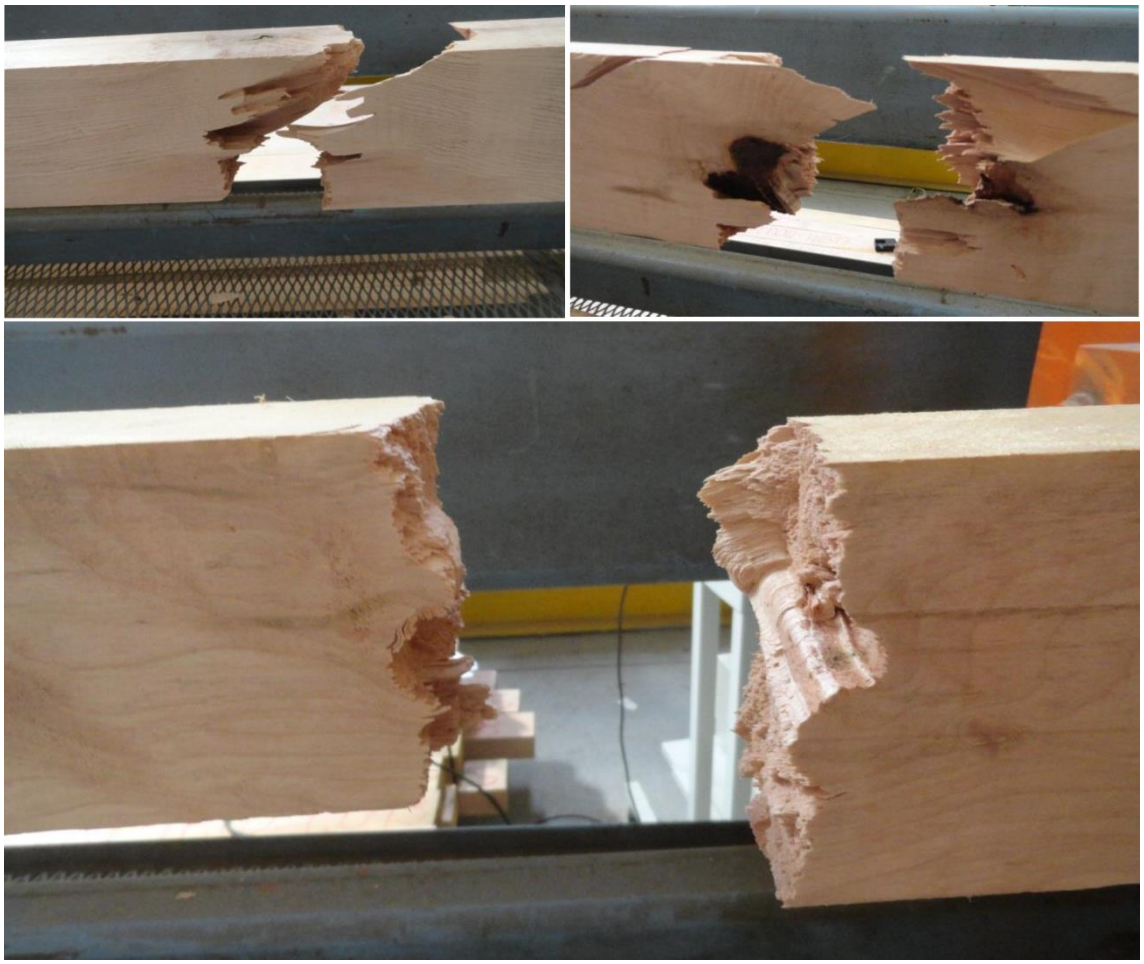
Descripción	Densidad (12%) N°2+ (NCh1970/1)	Densidad (12%) N°4+ (NCh 1970/1)
Promedio [kg/m^3]	587	594
valor mínimo [kg/m^3]	473	459
valor máximo [kg/m^3]	747	735
rango [kg/m^3]	274	276
desviación estándar [kg/m^3]	42	44
Coeficiente de variación	7%	7%
tamaño muestra	522	268

Figura 3.5: Fallas por flexión en piezas de Lenga



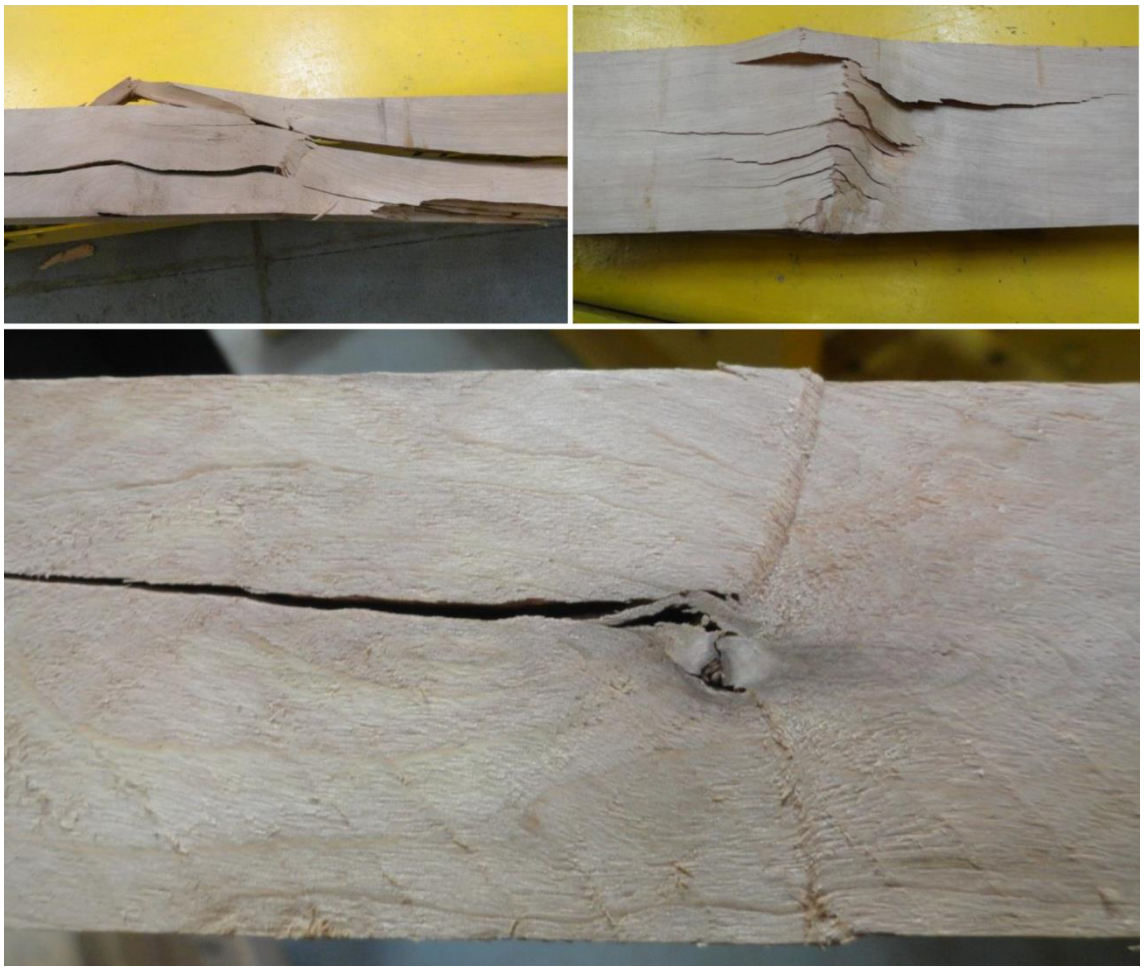
Fuente: Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR)

Figura 3.6: Fallas por tracción paralela en piezas de Lenga



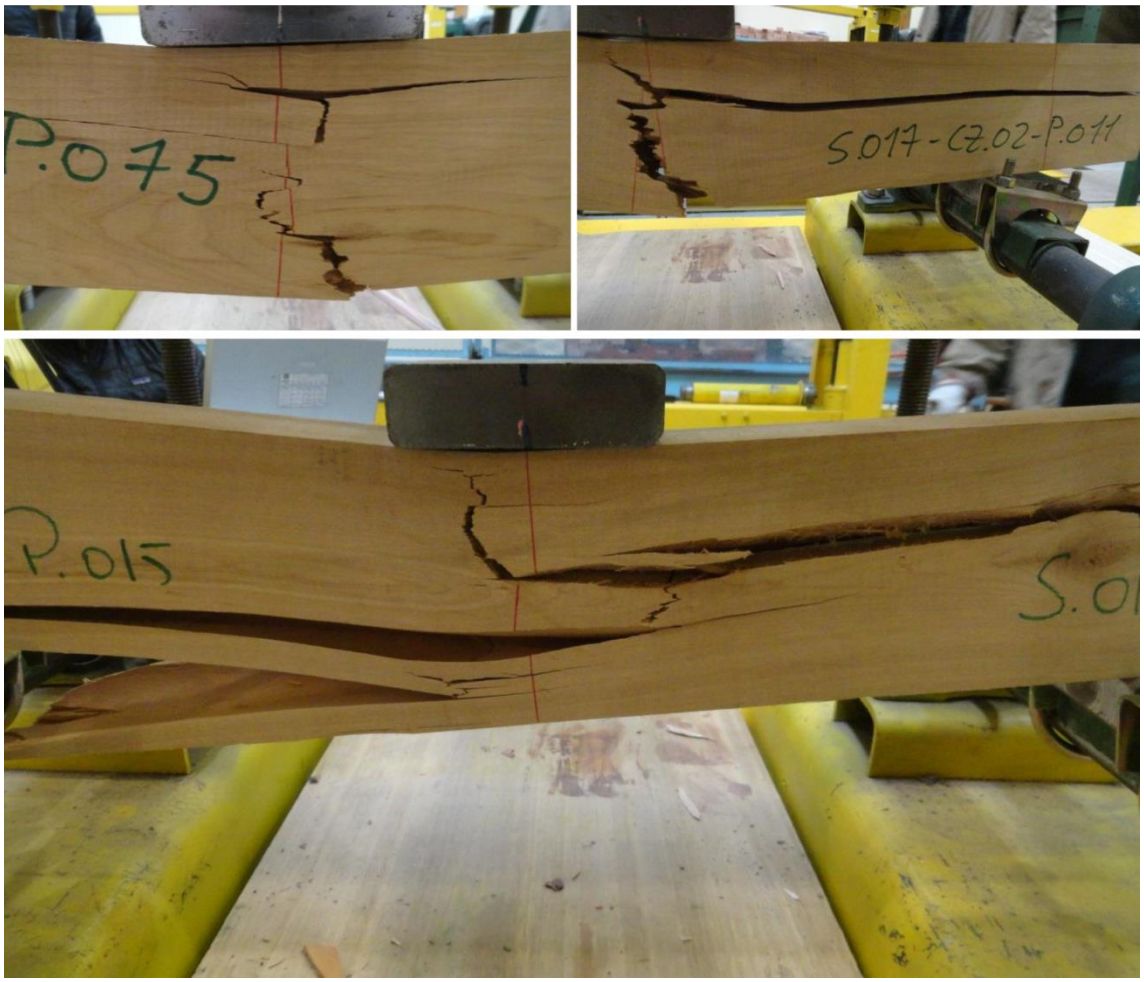
Fuente: Laboratorio de Madera Estructural del Instituto Forestal (LME-INFOR)

Figura 3.7: Fallas por compresión paralela en piezas de Lenga



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

Figura 3.8: Fallas por cizalle paralelo en piezas de Lenga



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

3.3 Valores admisibles

Los valores admisibles de resistencia en flexión, resistencia a la tracción paralela, resistencia a la compresión paralela, resistencia al cizalle paralelo, y módulo de elasticidad en flexión, obtenidos para los grados estructurales de Lenga, según la norma chilena (NCh 3028/2), se observan en la tabla 3.8.

El actual sistema de asignación de tensiones admisibles para las especies que se comercializan en Chile, exceptuando pino radiata, establece 12 clases estructurales denominadas “grados-F”, cada una de las cuales contiene los valores para las tensiones admisibles que se observan en la tabla 3.9. La clase estructural se identifica en la forma “FX”, donde “X” es la tensión admisible en flexión aproximadamente en Megapascal asignada al grado (INN, 1986).

La asignación de las tensiones admisibles se realiza mediante una relación entre un agrupamiento de especies madereras especificado en la norma NCh 1989, y el grado estructural proveniente de la clasificación visual especificada en la norma NCh 1970/1 para latifoliadas. El procedimiento para relacionar el agrupamiento de especies y el grado estructural se detalla en la norma NCh 1990.

Para el caso de la madera de Lenga seca, la actual asignación de tensiones admisibles, determina que los grados estructurales N°1, N°2, N°3 y N°4 corresponden a las clases F22, F17, F14 y F11, respectivamente (ver tabla 3.9).

Si asignamos los valores obtenidos en el presente estudio, el grado N°2+ (grado N°1 y N°2) tiene tensiones admisibles asimilables con a la clase F14, presentando valores superiores en la resistencia a la flexión, compresión paralela, y tracción paralela, junto con el módulo de elasticidad. En la resistencia al cizalle se observaron valor admisible menor.

Por otra parte el grado N°4+ (grado N°3 y N°4) obtuvo tensiones admisibles que son asimilables a la clase F8, presentando valores superiores en la resistencia a la flexión y compresión paralela, junto con el módulo de elasticidad. En la resistencia a la tracción paralela y al cizalle se observaron valores admisibles menores.

Estos valores admisibles obtenidos en el presente estudio para madera de Lenga, son menores a los que se pueden asignar bajo el actual sistema de tensiones admisibles vigente en la normativa chilena. En un caso práctico, esto puede llevar a asignar capacidades de resistencia superiores a las que realmente pueden resistir una pieza de Lenga, pudiendo generar problemas en el diseño de estructuras que consideren como material estructural a esta especie. Esto abre la necesidad de revisar el actual sistema de tensiones admisibles utilizado en la normativa chilena.

También, si comparamos los resultados obtenidos en Lenga con el estudio realizado con madera de Raulí el año 2014 en el LME-INFOR, bajo la misma clasificación visual estructural el grado N°2+ resultó asimilable con la clase F17, siendo superior al mismo grado en madera de Lenga (F14); mientras que el grado N°4+ fue asimilable con la clase F14 también siendo una clase superior a la madera de Lenga (F8) (INFOR, 2014).

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos para la madera de Lenga con el Pino radiata, principal especie forestal utilizada como material estructural en Chile, se puede concluir que los valores admisibles del grado N°2+ de Lenga es mayor a la mejor calidad visual del pino radiata (GS) (ver tabla 3.10); presentando valores de resistencia en flexión un 33% superior. Para el caso del grado N°4+ de Lenga, sus tensiones admisibles se encuentran en una calidad intermedia entre los grados G1 y GS de Pino radiata.

Lo expuesto en el párrafo anterior, abre la posibilidad de evaluar un cambio en los límites admisibles de la norma de clasificación visual NCh 1970/1, ajustando las exigencias para que los grados visuales N°1 al N°4 sean similares en resistencia y rigidez a los grados estructurales G1 o G2 de pino radiata, que son los más utilizados en el mercado nacional de construcción de viviendas.

Tabla 3.8: Valores admisibles para madera estructural de Lenga según normativa chilena

Grado estructural	**Valores admisibles de resistencia [MPa]**				**Módulo de Elasticidad admisible [MPa]**
	Flexión	**Tracción paralela**	**Compresión paralela**	**Cizalle paralelo**	
	(f_f)	**(f_{tp})**	**(f_{cp})**	**(f_{cz})**	**(E)**
N°2+ (NCh 1970/1)	14,7	8,8	11,3	0,8	11.056
N°4+ (NCh 1970/1)	10,7	5,0	9,4	0,6	11.085

Tabla 3.9: Valores admisibles de los grados-F según normativa chilena

Clase estructural	Tensiones admisibles [MPa]				Módulo de elasticidad en flexión [MPa]
	Flexión	Compresión paralela	Tracción paralela	Cizalle	
f34	34,5	26,0	20,7	2,45	18.150
f27	27,5	20,5	16,5	2,05	15.000
f22	22,0	16,5	13,2	1,70	12.600
f17	17,0	13,0	10,2	1,45	10.600
f14	14,0	10,5	8,4	1,25	9.100
f11	11,0	8,3	6,6	1,05	7.900
f8	8,6	6,6	5,2	0,86	6.900
f7	6,9	5,2	4,1	0,72	6.100
f5	5,5	4,1	3,3	0,62	5.500
f4	4,3	3,3	2,6	0,52	5.000
f3	3,4	2,6	2,0	0,43	4.600
f2	2,8	2,1	1,7	0,36	4.350

Fuente: NCh 1198

Tabla 3.10: Tensiones admisible para grados visuales de Pino radiata a 12% de humedad

Grado estructural	Tensiones admisibles				Módulo de elasticidad en flexión E_f
	Flexión F_f	Compresión paralela F_{cp}	Tracción paralela F_{tp}	Cizalle F_{cz}	
GS	11,0	8,5	6,0	1,1	10.500
G1	7,5	7,5	5,0	1,1	10.000
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	1,1	10.100
G2	5,4	6,5	4,0	1,1	8.900

Fuente: NCh 1198

4. CONCLUSIONES

De la clasificación visual estructural de madera de Lenga bajo la norma NCh 1970/1, se obtuvo una muestra representativa de 790 piezas clasificadas en los grados N°2+ y N°4+, según los requerimientos de la norma NCh3028/2.

Los ensayos mecánicos de la madera de Lenga evidenciaron que las propiedades de resistencia y rigidez aumentaron al mejorar la calidad estructural de la madera. Además, se evidenciaron fallas típicas en los ensayos de flexión, tracción paralela a la fibra, compresión paralela a la fibra, y cizalle paralelo a la fibra.

Los valores admisibles de resistencia y rigidez de los grados estructurales N°2+ y N°4+ de Lenga, son asimilables a las clases F14 y F8, respectivamente. Estos valores admisibles, son más bajos que los que se pueden obtener con la actual asignación de tensiones admisibles vigente en la normativa chilena.

Finalmente, los valores admisibles de Lenga son mayores en todos sus grados estructurales, a las calidades G1 y G2 de pino radiata crecido en Chile.

5. REFERENCIAS

Instituto Forestal (INFOR), 2014. Grados estructurales de la madera aserrada de Raulí clasificada visualmente.

Instituto Nacional de Normalización (INN), 1988. NCh 1970/1: Maderas – Parte 1: Especies latifoliadas – Clasificación visual para uso estructural – Especificaciones de los grados de calidad.

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), 2014. NCh 1198: Madera - Construcciones en madera – Cálculo.

6. ANEXOS

6.1 Determinación de valores admisibles de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/2 para grado estructural N°2+

	$f_{b,12}$[MPa]	**Eai2 [Mpa]**	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	61,4	11.056	599
valor mínimo	16,8	7.178	501
valor máximo	95,2	15.021	747
rango	78,3	7.843	246
desviación estándar	16,4	1.313	44
suma	8.044	1.448.322	78.440
tamaño muestra	131	131	131
Estadístico percentil 5%	6,6		6,6
Valor percentil 5	30,9		532
Factor seguridad + duración carga	1 /2,1	1,0	
valor admisible	**14,7**	**11.056**	

6.2 Determinación de valores admisibles de resistencia y rigidez en flexión según NCh 3028/2 para grado estructural N°4+

	$f_{b,12}$[MPa]	**Eai2 [Mpa]**	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	52,0	11.085	603
valor mínimo	7,7	7.880	507
valor máximo	91,9	14.546	721
rango	84,2	6.667	214
desviación estándar	17,3	1.652	41
suma	3.484	742.725	40.375
tamaño muestra	67	67	67
Estadístico percentil 5%	3,4		3,4
Valor percentil 5	22,5		533
Factor seguridad + duración carga	1 /2,1	1,0	
valor admisible	**10,7**	**11.085**	

6.3 Determinación de valores admisibles de resistencia a la tracción paralela según NCh 3028/2 para grado estructural N°2+

	$f_{t,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	37,9	586
valor mínimo	12,1	496,6
valor máximo	64,1	715,2
rango	52,0	218,6
desviación estándar	12,1	39,5
suma	4.968	76.808
tamaño muestra	131	131
Estadístico percentil 5%	6,6	6,6
Valor percentil 5	18,5	519
Factor seguridad + duración carga	1 /2,1	
valor admisible	**8,8**	

6.4 Determinación de valores admisibles de resistencia a la tracción paralela según NCh 3028/2 para grado estructural N°4+

	$f_{t,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	28,2	593
valor mínimo	4,3	460,9
valor máximo	66,6	734,6
rango	62,3	273,7
desviación estándar	11,6	49,8
suma	1.861	39.126
tamaño muestra	66	66
Estadístico percentil 5%	3,30	3,30
Valor percentil 5	10,5	504
Factor seguridad + duración carga	1 /2,1	
valor admisible	**5,0**	

6.5 Determinación de valores admisibles de resistencia a la compresión paralela según NCh 3028/2 para grado estructural N°2+

	$f_{c,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	33,4	588
valor mínimo	12,7	511,1
valor máximo	49,8	698,2
rango	37,1	187,1
desviación estándar	6,6	42,7
suma	4.342	76.377
tamaño muestra	130	130
Estadístico percentil 5%	6,5	6,5
Valor percentil 5	21,5	528
Factor seguridad + duración carga	1 / 1,9	
valor admisible	**11,3**	

6.6 Determinación de valores admisibles de resistencia a la compresión paralela según NCh 3028/2 para grado estructural N°4+

	$f_{c,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	30,2	588
valor mínimo	5,1	459,0
valor máximo	44,6	662,3
rango	39,5	203,3
desviación estándar	8,0	42,3
suma	2.051	39.989
tamaño muestra	68	68
Estadístico percentil 5%	3,4	3,4
Valor percentil 5	17,8	503
Factor seguridad + duración carga	1 / 1,9	
valor admisible	**9,4**	

6.7 Determinación de valores admisibles de resistencia al cizalle paralelo según NCh 3028/2 para grado estructural N°2+

	$f_{cz,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	6,6	576
valor mínimo	2,2	473,1
valor máximo	10,6	677,6
rango	8,4	204,5
desviación estándar	1,6	37,7
suma	861	74.851
tamaño muestra	130	130
Estadístico percentil 5%	6,5	6,5
Valor percentil 5	3,5	523
Factor seguridad + duración carga	1 / 4,1	
valor admisible	**0,8**	

6.8 Determinación de valores admisibles de resistencia al cizalle paralelo según NCh 3028/2 para grado estructural N°4+

	$f_{cz,12}$[MPa]	**densidad 12% [kg/m3]**
Promedio	6,0	592
valor mínimo	2,2	507,5
valor máximo	10,5	704,7
rango	8,3	197,2
desviación estándar	2,0	41,5
suma	400	39.653
tamaño muestra	67	67
Estadístico percentil 5%	3,4	3,4
Valor percentil 5	2,6	520
Factor seguridad + duración carga	1 / 4,1	
valor admisible	**0,6**	

OFICINA DIAGUITAS
Km 5 costado aeródromo La Florida, La Serena
Fono / Fax: (56-51) 543627

SEDE METROPOLITANA
Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago
Fono: (56-2) 23667100. Fax: (56-2) 23667131

SEDE BIO BIO
Camino a Coronel km 7,5, San Pedro de la Paz, Concepción
Fono / Fax: (56-41) 2853260

SEDE VALDIVIA
Fundo Teja Norte s/n, Valdivia
Fono: (56-63) 218968

OFICINA PATAGONIA
Camino Coyhaique Alto km 4, Coyhaique
Fono: (56) 98831860

INFOR

www.infor.cl

www.construccionenmadera.cl