

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Pinus elliottii* Eng. **DEL LITORAL DE URUGUAY**



Informe N°1

Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino "GT3"
Dirección General Forestal M.G.A.y P.
Sociedad de Productores Forestales
Asociación de Industriales de la Madera
LATU Sector Productos Forestales

Octubre 2002

Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino

Persona	Institución
Ing. Agr. Peter Baptista	Dirección General Forestal M.G.A.P.
Ing. Agr. Carlos Voulminot	Sociedad de Productores Forestales
Ing. Bernardo Acle	Sociedad de Productores Forestales
Ing. Agr. Carlos Trambauer	Sociedad de Productores Forestales
Dr. Sadaaki Ohta	LATU (Asesor)
Per. Agr. Hugo O'Neill	LATU Sector Productos Forestales
Tec. Agr. Felipe Tarigo	LATU Sector Productos Forestales
Ing. Quím. Raúl de Castro	LATU Sector Productos Forestales
Dilvar Silva	LATU Sector Productos Forestales
Francisco Gatto	LATU Sector Productos Forestales

Equipo de trabajo técnico
Per. Agr. Hugo O'Neill
Tec. Agr. Felipe Tarigo
Ing. Agr. Carlos Trambauer

Agradecimientos

A Industrias Forestales Puerto Arazatí S.A. y a la Caja Notarial de Seguridad Social por el apoyo recibido en la realización de este estudio.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *PINUS ELLIOTTII* ENG. DEL LITORAL DE URUGUAY

	Página
1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES	5
2.1 <u>Muestreo y clases diamétricas de los árboles</u>	5
2.2 <u>Características de los rodales</u>	6
2.2.1 <u>Datos técnicos del rodal</u>	6
2.2.2 <u>Manejos (podas y raleos)</u>	6
3. ENSAYOS EN LAS TROZAS	7
3.1 <u>Clasificación visual de trozas</u>	7
3.2 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica</u>	8
3.3 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	9
3.4 <u>Aserrado de trozas para obtención de las tablas (2"X 6")</u>	9
4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6"	11
4.1 <u>Secado de las tablas en horno industrial</u>	11
4.2 <u>Dimensionado de las tablas e inspección visual</u>	11
4.3 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2"x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	12
4.4 <u>Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (máquina universal) sobre tablas de 2" x 6"</u>	12
4.5 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Corriente de tablas ensayadas</u>	13
5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS	14
5.1 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)</u>	14
5.2 <u>Determinación de la Resistencia al Impacto y la Flexión Dinámica</u>	15
5.3 <u>Determinación de la Dureza JANKA</u>	16
5.4 <u>Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Corriente</u>	16
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
6.1 <u>Estudios realizados sobre trozas en estado verde</u>	16
6.1.1 <u>Clasificación visual</u>	16

6.1.2	Contenido de Humedad y Densidad Básica	17
6.1.3	Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio	17
6.1.3.1	Análisis por altura según ubicación en el radio	19
6.1.4	Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura	19
6.1.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	20
6.1.5	Módulo de Elasticidad de las trozas	21
6.2	<u>Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")</u>	23
6.2.1	Resumen de las propiedades mecánicas en tablas (solo B y C)	23
6.2.2	Relación entre las distintas propiedades mecánicas	24
6.2.3	Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural	25
6.2.4	Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas	25
6.2.5	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	26
6.2.5.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	27
6.2.6	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en altura	27
6.2.6.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	28
6.2.7	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas	29
6.2.8	Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS	29
6.3	<u>Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos</u>	31
6.3.1	Resumen de las propiedades mecánicas	31
6.3.2	Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio	31
6.3.3	Variación de las propiedades mecánicas en la altura	33
6.3.4	Análisis de las propiedades mecánicas por altura según la ubicación en el radio	35
6.3.5	Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según la altura	36
6.3.6	Relación entre las distintas propiedades	38
6.3.7	Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos	38
	Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Pinus elliotii</i> del Litoral de Uruguay	40
	Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos	41

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de *Pinus elliottii* del departamento de Río Negro, al oeste de Uruguay.

Se clasificaron visualmente las trozas obtenidas a tres alturas del fuste y se les determinó la densidad básica y el contenido de humedad y módulo de elasticidad.

A las tablas secas se les midió el módulo de elasticidad por método no-destructivo. Luego se determinó el módulo de rotura mediante ensayo de flexión estática.

De las mismas tablas se confeccionaron y ensayaron pequeñas probetas libres de defectos.

Se estudió la variación de las propiedades físicas y mecánicas en la dirección radial (variación de la médula a la corteza) y en la altura del fuste.

Palabras clave: *Pinus elliottii*, módulo de elasticidad, módulo de rotura, densidad, propiedades mecánicas.

SUMMARY

In this report mechanical properties of *Pinus elliottii* from western Uruguay, Rio Negro department, were studied.

The logs from three heights were visually graded and the basic density and moisture content were measured.

Modulus of elasticity and modulus of rupture (static bending) of kiln dried boards were calculated.

From the same boards, small clear specimens were tested.

The variation of physical and mechanical properties within trees (variation from pith to bark and in the tree height) was analyzed.

Key words: *Pinus elliottii*, modulus of elasticity, modulus rupture, density, mechanical properties

1. INTRODUCCIÓN

A los efectos de identificar e implementar los estudios faltantes para ayudar en la planificación a nivel nacional y a nivel de los productores, buscando facilitar el acceso a los mercados, en diciembre del 2000, se ha formado un Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucaliptos y Pinos (GT2 y GT3), en el cual participan la Sociedad de Productores Forestales, la Asociación de Industriales de la Madera, la División Forestal del MGAP y el LATU.

Dado que las maderas nacionales están parcialmente caracterizadas, es necesario profundizar los conocimientos sobre ellas para definir la aptitud para los usos finales y promover su uso racional

Se ha decidido realizar muestreos de plantaciones de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, de las zonas norte, litoral y sur para estudios de caracterización de propiedades físicas y mecánicas, con el fin de caracterizar la madera para la construcción y su posterior clasificación.

Le atribuímos gran importancia al conocimiento y a la caracterización de nuestras especies forestales para la obtención de madera de buena calidad. Esta primer publicación pretende colaborar en el conocimiento de las características de la especie *Pinus elliottii* implantada en el Uruguay. En este caso analizaremos la madera de un rodal del litoral de nuestro país, más precisamente del departamento de Río Negro.

2. MATERIALES

2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles

La selección de los árboles se realizó mediante un muestreo selectivo, en un rodal previamente seleccionado por especie, edad y manejo, realizado en agosto del 2001.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 30 árboles divididos en tres clases diamétricas (10 por clase). La selección se realizó por diámetro, poca conicidad, rectitud del fuste y hábito de ramas. A cada árbol se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de la primera rama viva, altura total y altura comercial (15 cm. de diámetro).

Se obtuvieron tres trozas de cada árbol, cada una de 4 m de largo, identificándolas con un número compuesto de 2 partes, la primera el número de árbol (correlativos del 1 al 30) y la segunda el número de troza (1ra., 2da. y 3ra. troza), ejemplo la troza 5-2 es la 2da. troza del árbol 5.

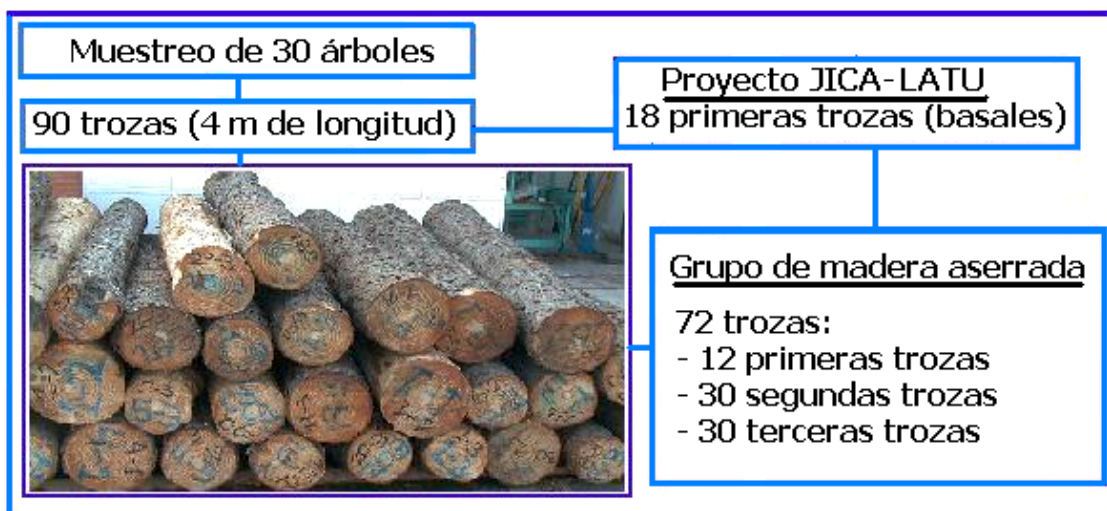


Figura N° 1: Muestreo y distribución de las trozas.

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

Cuadro N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados.

Clases diamétricas		Número de	DAP c/c	Altura (m)		
Clase	Rango (cm)	Individuos	Medio (cm)	Total	Ø = 15 cm	1° rama viva
1	< 40	11	36,0	24,3	19,2	12,3
2	40-43	10	41,2	24,3	19,3	12,5
3	≥ 44	9	45,7	23,7	19,0	11,2

2.2 Características de los rodales muestreados

2.2.1 Datos técnicos del rodal

Cuadro N° 2: Datos técnicos del rodal.

Especie	<i>Pinus elliottii</i> Eng.
Localidad / Departamento	Algorta / Río Negro
Año de Plantación	1977
Origen de la semilla	INTA Argentina
Densidad de plantación (árboles / hectárea)	1600
Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.	9.3

2.2.2 Manejos (podas y raleos)

En los siguientes cuadros se presentan los manejos realizados al rodal muestreado:

Cuadro N° 3: Podas realizadas.

Podas			
Número	Edad (años)	Altura (m)	N° de árboles
1	6	2,4	Todos
2	10	5,5	450

Cuadro N° 4: Raleos realizados.

Raleos		
Número	Edad (años)	Densidad remanente (árb./ha)
1	8	750
2	12	450
3	18	250

3. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 72 trozas verdes seleccionadas para el Grupo de la Industria, se realizaron en el LATU los ensayos que se comentan seguidamente:

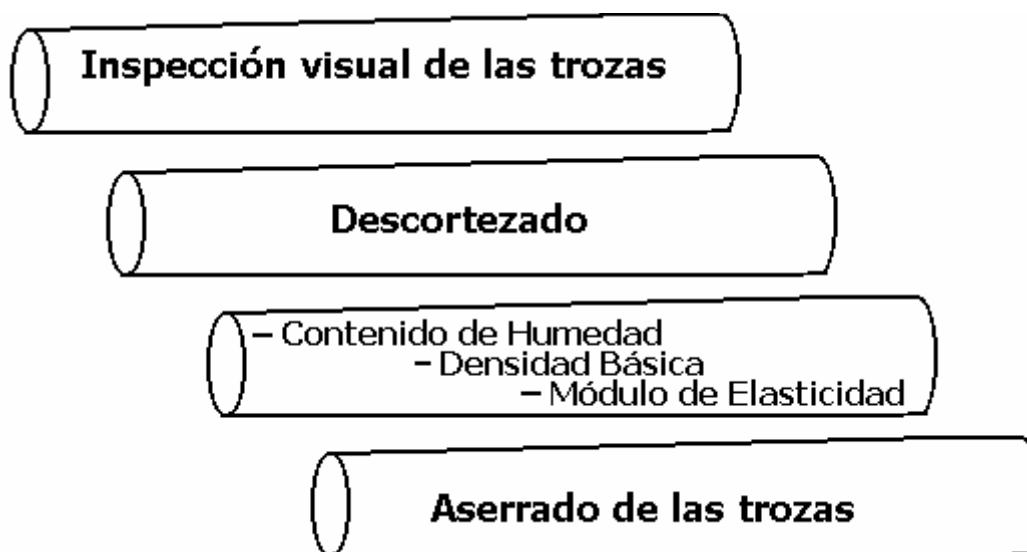


Figura N° 2: Orden en la realización de los trabajos.

3.1 Clasificación visual de las trozas

Las trozas fueron clasificadas visualmente, agrupándolas en distintas categorías o grados de acuerdo con su rectitud, diámetro y cantidad y disposición de nudos.

Los distintos grados se muestran a continuación:

Cuadro N° 5: Grados de clasificación de las trozas.

- Grado I: Troza derecha, sin nudos ni otros defectos, baja conicidad.
- Grado II: Troza levemente torcida, con nudos pequeños (poca cantidad) o internudos cortos y conicidad media.
- Grado III: Troza que presenta algunas de las siguientes características o varias combinadas: curvas, abundantes nudos o de gran tamaño, otros defectos como alta conicidad, rajaduras, etc.
- Grado IV: Troza con severos defectos, muy mala

3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica.

Finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas, dejándolas de 3 m de longitud. Al metro restante se le cortó una rodaja de aproximadamente 5 cm de espesor para realizar los ensayos de densidad y contenido de humedad.

A la rodaja extraída se la identificó y se dibujó en forma radial la ubicación de las probetas de contenido de humedad y de densidad. Luego se le saco una fotografía en la que aparece una regla sobre la rodaja de forma de poderla usar como referencia para medir la distancia del centro de las probetas a la médula.

Se extrajeron tres probetas por rodaja dispuestas en forma lineal y radial entre la médula y la corteza. A las mismas se las llamo A, B y C siendo la probeta A la más próxima a la médula y la C la más próxima a la corteza. (Ver figura N° 3)



Figura N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas.

Una vez fotografiada la rodaja se cortaron y pesaron las probetas (Peso verde). Seguidamente se sumergieron en agua para conservar su humedad, de forma de poder calcular el volumen por el principio de Arquímedes. Para calcular el volumen mediante este método se pesaron en el plato de la balanza las probetas húmedas y posteriormente se pesaron sumergidas en agua. El volumen es la diferencia entre el peso en el aire de la probeta húmeda y el peso de esta sumergida .

Las probetas son posteriormente secadas a estado anhidro en una estufa a 103 ± 2 ° C. Para la determinación de la densidad básica se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method B-III.

Las fórmulas para los cálculos fueron las siguientes:

$$D_{basica} = \frac{P_{Anh}}{V_V}$$

$$V_V = P_{sat} - P_{sum}$$

$$CH = \frac{P_V - P_{Anh}}{P_{Anh}} \times 100$$

D_{basica}	: Densidad aparente básica (g/cm ³)
V_V	: Volumen verde
P_{Anh}	: Peso anhidro
P_{sat}	: Peso húmedo
P_{sum}	: Peso sumergido
P_V	: Peso verde
CH	: Contenido de Humedad (%)

3.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer

Las trozas remanentes (en estado verde), de 3 metros de largo fueron pesadas y medidas en longitud, diámetro mayor y diámetro menor).

Para determinar el módulo de elasticidad (MOE) se realizó el ensayo no destructivo basado en el método de la frecuencia de vibración longitudinal, con un equipo FFT Analyzer (Primera Transformada de Fourier). Este es un equipo que analiza el sonido producido por el impacto de un martillo, que luego de atravesar la probeta es captado en el otro extremo mediante un micrófono. De este sonido se analiza la principal frecuencia de vibración con la cual se calcula el MOE.

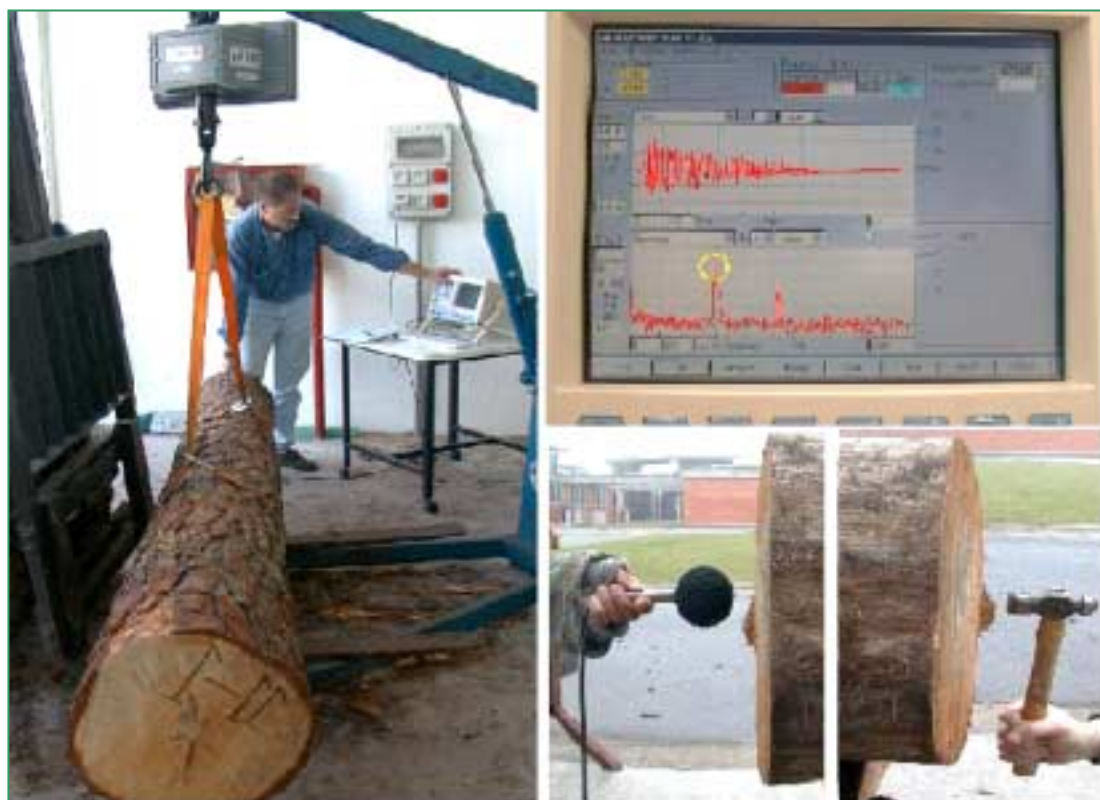


Figura N° 4: Determinación Módulo de Elasticidad mediante FFT Analyzer

A partir de la frecuencia obtenida se calcula el Módulo de elasticidad mediante la siguiente fórmula:

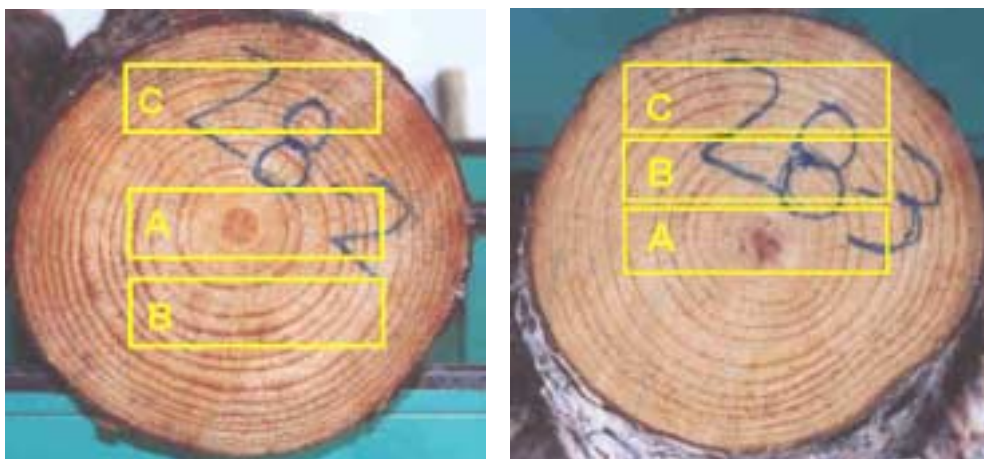
$$fl = \left(\frac{n}{2 \cdot L} \right) \cdot \left(\frac{E_{ft} \cdot g}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$E_{ft} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot fl^2 \cdot \rho}{g}$$

- | | |
|----------------------------|--|
| E_{ft} | : MOE por vibración longitudinal |
| L | : Largo de la troza |
| fl | : Frecuencia de vibración longitudinal |
| g | : Constante de aceleración gravitacional |
| n | : n° de nodo = 1 |
| ρ | : Densidad de la madera (troza) |

Una vez finalizado el ensayo de las trozas, a alguna de ellas se las descortezó y se les repitió el ensayo, de forma de estimar los valores del MOE con y sin corteza y poder correlacionarlos.

3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas (2"x 6")

Las trozas fueron aserradas, buscando obtener de cada una de ellas tres tablas identificadas por su ubicación como: "A" la que incluían médula y por consiguiente un alto porcentaje de madera juvenil, "B" tablas cercanas a la médula con diferentes porcentajes de madera adulta y juvenil y "C" tablas próximas a la corteza con un mayor porcentaje de madera adulta. Ver las siguientes figuras N° 5 y 6.



Figuras N° 5 y 6: Esquemas de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trozas.



Figuras N° 7 y 8: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6")

4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2"X 6"

Finalizado el aserrado de las trozas ensayadas se procedió a continuar con los ensayos sobre las tablas obtenidas:

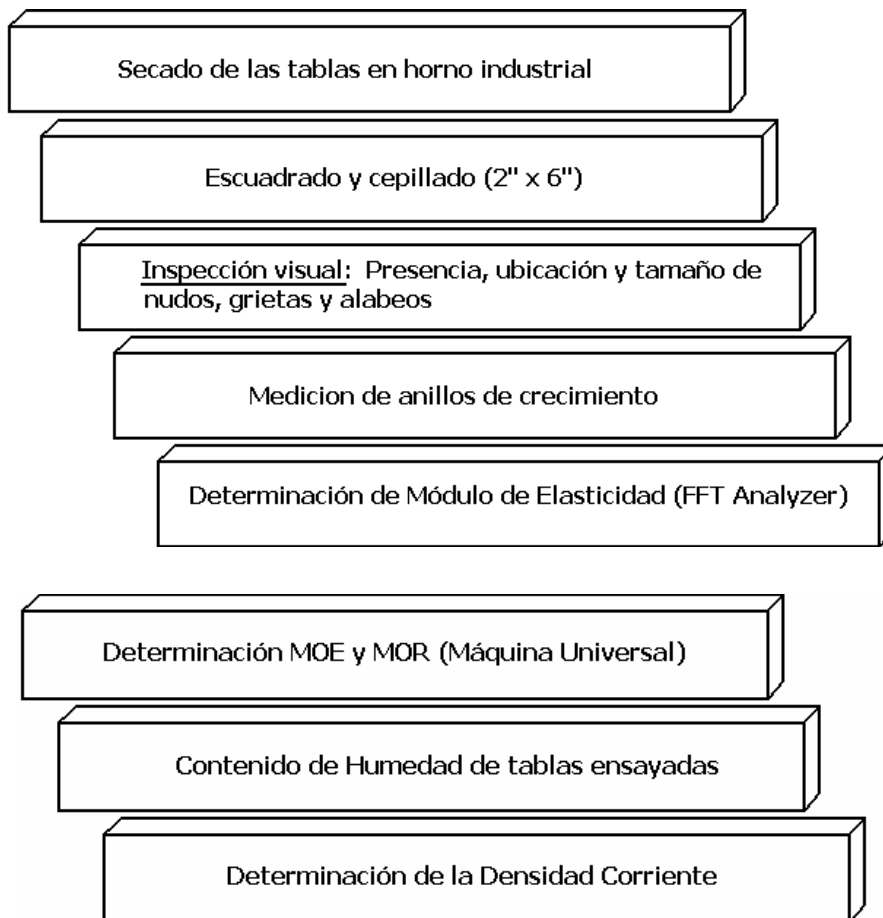


Figura N°9: Continuación de los ensayos en tablas de 2"x 6".

4.1 Secado de las tablas en horno industrial

El secado de las tablas se realizó en su totalidad en hornos industriales. El contenido de humedad final promedio de las probetas fue de 10,5 %. Luego del secado de las tablas se les controló el contenido de humedad mediante un xilohigrómetro de resistencia y se comprobó dicho contenido de humedad mediante pequeñas probetas obtenidas de los extremos de las tablas, una vez que estas son ajustadas a su longitud final de ensayo 2,80 m.

4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual

Las tablas luego de ser secadas se cepillaron y escuadraron llevándolas a las dimensiones finales de ensayo con escuadrias de 2800 mm x 150 mm x 50 mm.

A las tablas prontas para ser ensayadas se les realizó una inspección visual de defectos como nudos (tamaño y ubicación), grietas, etc. Se confeccionó una ficha en la que se representa a las cuatro caras de la tabla en un mismo plano. Sobre esta ficha se dibujaron los nudos teniendo en cuenta su forma y ubicación. Se midió el diámetro mayor del nudo y el valor se coloca al costado del dibujo del mismo. Se midió también el ancho promedio de anillos anuales para cada tabla.

4.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2" x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer

A las tablas se les realizó el ensayo no destructivo para la determinación del módulo de elasticidad (MOE) por medio del equipo FFT Analyzer. Para obtener la densidad se midió el volumen por las dimensiones.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$E_{ft} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot fl^2 \cdot \rho}{g}$$

E_{ft} : MOE por vibración longitudinal
 L : Largo de la tabla
 fl : Frecuencia de vibración longitudinal
 g : Constante de aceleración gravitacional
 ρ : Densidad corriente de la madera (peso corriente/ volumen corriente)

4.4 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (máquina universal) sobre tablas de 2" x 6"

Los ensayos mecánicos destructivos para determinar el MOE y el MOR fueron realizados en la Máquina universal Minebea de 250 kN de capacidad. Las tablas fueron sometidas a un esfuerzo de flexión estática de 4 puntos, con una separación entre apoyos inferiores (span) de 2520 mm y que recibieron un esfuerzo en 2 puntos separados 840 mm entre sí. (Ver figura N° 10)

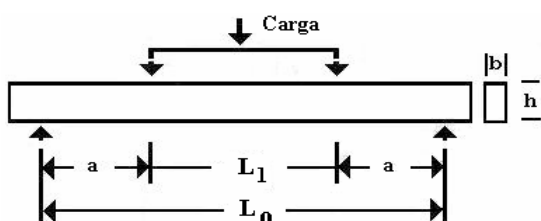


Figura N° 10. Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

Se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" D 198 -98 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes - Flexure.

El Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura fueron determinados en el mismo ensayo de flexión estática y calculados en forma automática por la Máquina Universal una vez finalizado el ensayo, utilizando las siguientes fórmulas:

$$MOE_{4p} = \frac{\Delta P \cdot \frac{(L_0 - L_1)}{2} \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y}$$

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.
 L_0 : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 L_1 : Distancia entre apoyos superiores de carga
 I : Momento de Inercia
 Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

I : Momento de Inercia
 b : Ancho de la tabla
 h : Altura de la tabla

$$MOR_{4p} = \frac{3 \cdot P \cdot (l - a)}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

P : Carga máxima
 l : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 a : Distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior más próximo
 b : Ancho de la tabla
 h : Altura de la tabla

Una vez terminado el ensayo y rotas las tablas se dibujan las líneas de fractura en la misma ficha en la que se realizó la inspección visual. Además se fotografían las tablas de forma de tener un registro de la forma en que se produjo la rotura.

4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Corriente de tablas ensayadas

De las partes sobrantes del ensayo mecánico de flexión estática (2800 x 150 x 50 mm) se confeccionaron probetas (40 x 50 x 150 mm de longitud), orientadas transversalmente a la longitud de la tabla, cubriendo de esta forma el rango de variación de contenido de humedad y de la densidad en el ancho de la tabla.

Las probetas fueron pesadas (peso corriente), medidas en sus tres dimensiones para obtener el volumen y posteriormente secadas en estufa a $103 \pm 2^\circ$ C hasta peso constante para obtener el peso anhidro.

Para la determinación de la densidad corriente se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method A.

Las formulas utilizadas fueron las siguientes:

$$D_{corriente} = \frac{P_{Anh}}{V_{corriente}}$$

$$CH = \frac{P_{corriente} - P_{Anh}}{P_{Anh}} \times 100$$

$D_{corriente}$: Densidad aparente corriente (g/cm^3)
 $V_{corriente}$: Volumen a 10,5 % CH
 P_{Anh} : Peso anhidro
 $P_{corriente}$: Peso corriente
 CH : Contenido de Humedad (%)

Nota: La densidad corriente se define como el cociente entre el peso anhidro y el volumen a 12% CH. En este trabajo se estimó la densidad corriente a partir del volumen a 10,5% CH para las tablas y a 10,9% CH para las pequeñas probetas libres de defectos.

5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS

A partir de los restos de las probetas de 2" x 6" ensayadas en flexión estática, se confeccionaron pequeñas probetas libres de defectos, con una correcta orientación de los anillos de crecimiento. Todas las probetas fueron acondicionadas en cámara climatizada en las condiciones de 20° C de temperatura y de 65 % de humedad relativa, para lograr un contenido aproximado de humedad en las mismas del 12 %.

Se realizaron los tres ensayos en pequeños especímenes que se consideraron de mayor relevancia:

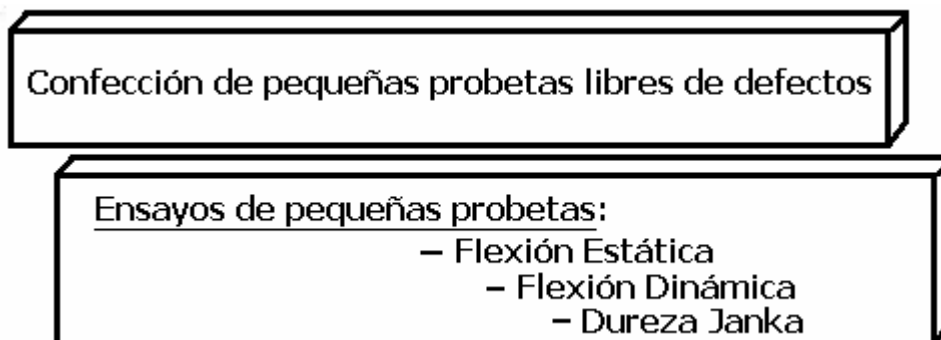


Figura N° 11: Ensayos de pequeñas probetas libres de defectos.

5.1 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)

El ensayo de flexión estática se realizó sobre probetas de 400 x 25 x 25 mm, en la Máquina universal Minebea, utilizando una celda de carga de 50 kN de capacidad, con una distancia de apoyos inferiores (span) de 350 mm, ejerciendo la carga en la cara radial y en el centro de la probeta. (Ver figura N° 12)

Para este ensayo se utilizó la norma JIS (Japan Industrial Standard) Z 2113 "Method of Bending Test for Wood".

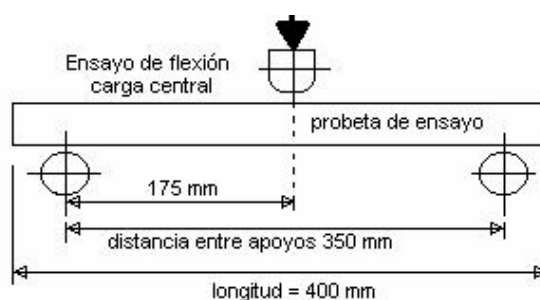


Figura N° 12: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

Las formulas utilizadas para el cálculo del MOE y el MOR en pequeñas probetas fueron las siguientes:

$$MOE_{3P} = \frac{\Delta P \cdot l^3}{4 \cdot \Delta y \cdot b \cdot h^3}$$

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional
 l : Distancia entre apoyos inferiores (span)
 I : Momento de Inercia
 b : Ancho de la probeta
 h : Altura de la probeta
 Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

$$MOR_{3P} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

P : Carga máxima
 l : Span
 b : Ancho de la probeta
 h : Altura de la probeta

5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica

El ensayo de flexión dinámica se realizó sobre probetas de 300 x 20 x 20 mm., en péndulo Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se produjo en el centro de la probeta, orientado sobre la cara radial.

La norma utilizada fue la JIS (Japanese Industrial Standard) Z2116 "Method of Impact Bending Test for Wood".

Para el cálculo de la resistencia a la flexión dinámica se usó la siguiente fórmula:

$$RI = \frac{E}{b \cdot h}$$

RI : Resistencia al Impacto (J/cm²)
 E : Energía absorbida (J)
 b : Ancho de la probeta (cm)
 h : Altura de la probeta (cm)

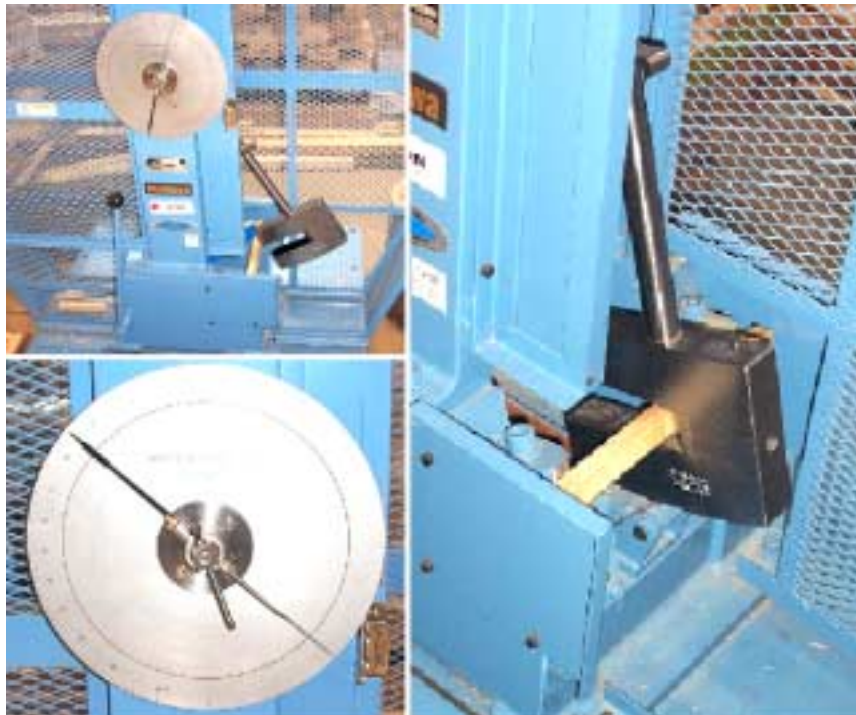


Figura N° 13: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)

5.3 Determinación de la Dureza JANKA

El ensayo de resistencia a la dureza se realizó sobre probetas de 150 x 45 x 45 mm en máquina universal Minebea con una celda 50 kN de capacidad, sobre las caras radiales, tangenciales y transversales. La determinación de la dureza se realiza por medio de la penetración en la madera de las probetas de una media esfera ($\varnothing = 11.3$ mm) a una velocidad de 6 mm/mín. Se utilizó para este ensayo la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" D 143 Hardness.

La dureza se expresa como el valor de la carga requerido para la penetración del accesorio en la probeta. (Ver Figura N°14)



Figura N° 14: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.

5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Corriente

Una vez finalizados los ensayos en pequeñas probetas, se determinó el contenido de humedad y la densidad corriente de las mismas. Se utilizaron los mismos métodos y fórmulas de cálculo que en las determinaciones de tablas (2"x 6")

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Estudios realizados sobre trozas en estado verde

6.1.1 Clasificación visual

Con el fin de caracterizar y diferenciar la calidad de las trozas a las distintas alturas muestreadas, éstas se clasificaron en tres categorías. De cada árbol se obtuvieron 3 trozas de 4 metros cada una. En el Cuadro N° 6 se muestra, para cada tipo de troza la proporción de las mismas que pertenecen a cada categoría. El criterio de clasificación está descrito en el capítulo 3.1.

Cuadro N° 6: Proporción de trozas según la categoría a la que pertenecen

	CATEGORÍA		
	I	II	III
Troza 1	0,87	0,13	0,00
Troza 2	0,20	0,70	0,10
Troza 3	0,00	0,27	0,73

Recordemos que los árboles fueron podados a 5.5 m de altura es decir aproximadamente hasta la mitad de la segunda troza. Esto concuerda con lo observado en el cuadro, donde en las trozas basales hay preponderancia de trozas de categoría I, en segundas trozas predomina la categoría II y en menor grado la categoría I, y en las terceras trozas (no podadas) hay una preponderancia de trozas de la categoría III.

6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Básica

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 138%, encontrándose variaciones importantes para una misma ubicación en radio y altura, entre los distintos individuos. Esta variación está dada por características de la madera como la proporción leño temprano y leño tardío, presencia de extractivos, edad de la madera, por los procesos de duraminización y por la variación entre individuos.

El contenido de humedad y su variabilidad son características importantes para tener en cuenta para definir programas de secado y para los procesos de impregnación. Además la variación del contenido de humedad en el radio nos puede dar una pauta de si la madera está duraminizada o no.

La densidad básica promedio fue de 0,39 g/cm³ encontrándose también variaciones importantes entre árboles y dentro del mismo árbol.

Cuadro N° 7: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Básica

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Básica (g/cm³)
Número	216	216
Promedio	138	0,391
Máximo	224	0,649
Mínimo	36	0,254
STD	47	0,058
CV %	34	14,9

6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio

Para el contenido de humedad y la densidad básica se encontró un patrón de variación en el radio y en altura. En el radio, el contenido de humedad aumenta desde una ubicación próxima a la médula (probetas A) hasta la zona central (probetas B) disminuyendo luego más cerca de la corteza (probetas C). Existe una variabilidad muy grande en las probetas A siendo más homogénea en las probetas B y C. Esto nos permite definir con mayor precisión programas de secado y de impregnación para las tablas B y C logrando luego mayor homogeneidad de los procesos. Ver Cuadro N°8.

La densidad básica se comporta de forma opuesta, disminuyendo desde la médula hasta la zona central y luego aumentando hacia la corteza. Estos comportamientos se pueden ver con claridad en el gráfico N°1. También para la densidad la variación es mucho mayor en las probetas A.

Cuadro N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio

Probeta	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm ³)		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
A	72	92	41,4	44,8	0,405	0,068	16,8
B	72	182	24,5	13,5	0,351	0,030	8,7
C	72	141	20,2	14,4	0,412	0,04	9,4
Promedio		138		24,2	0,389		11,6

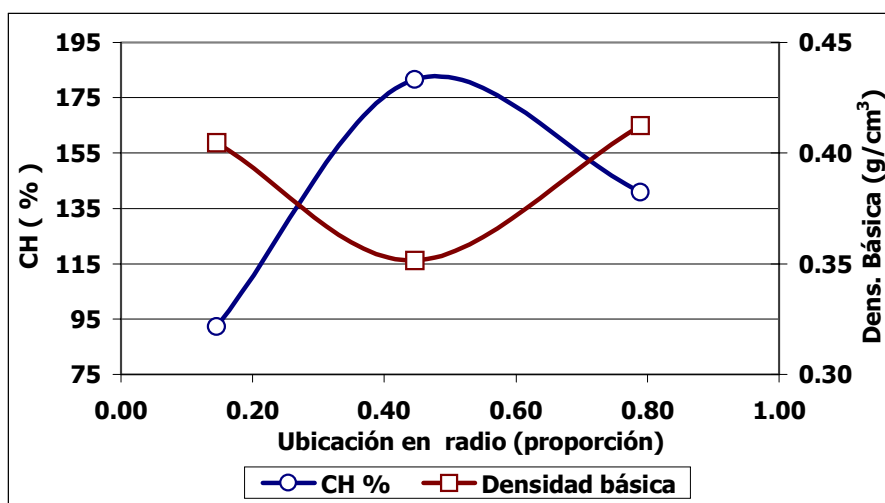


Gráfico N°1: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación radial en el fuste

Normalmente la densidad cerca de la médula es baja luego de sacar los extractivos. Pensamos que el comportamiento observado se puede deber a la gran cantidad de resina existente en la zona cercana a la médula, que al permanecer dentro de las probetas eleva su densidad básica y baja el contenido de humedad. La variación del contenido de resina en las distintas probetas A provoca la mayor variabilidad de los resultados en esta zona.

La densidad aumentaría con la edad de la madera alcanzando un valor máximo en el que se mantendría constante. Esto se pudo ver cuando se analizó la densidad en función del anillo representativo de cada probeta. En el largo plazo esperaríamos que la madera producida en la segunda y tercera troza llegara a estabilizar su densidad en estos valores máximos.

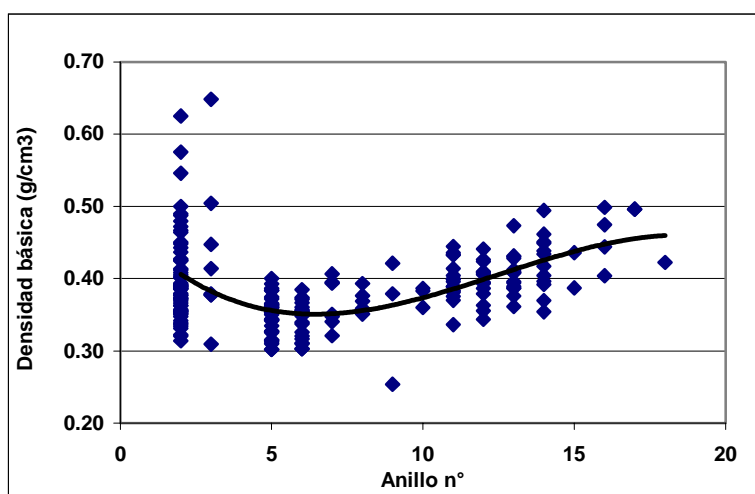


Gráfico N°2: Densidad Básica según anillo medio de la probeta

6.1.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio

En el análisis según ubicación en el radio para cada una de las alturas por separado se puede ver que para todos los casos las propiedades siguen la misma tendencia que la promedio, desplazándose hacia arriba o hacia abajo en el gráfico según de que altura se trate. Estas diferencias entre alturas están dadas básicamente por la distinta proporción de albura y por la distinta relación madera juvenil / madera adulta, que encontramos en las distintas alturas.

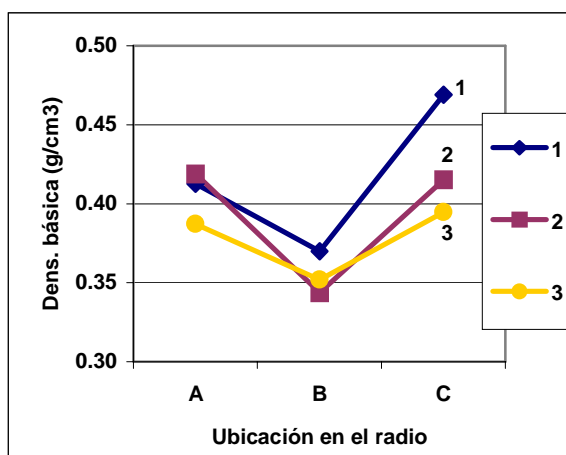


Gráfico N°3: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio

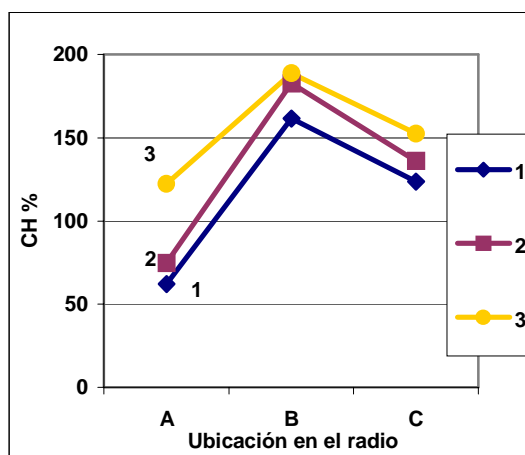


Gráfico N°4: Densidad Básica por altura según ubicación en el radio

6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura

En cuanto a la variación en altura, el contenido de humedad promedio aumentó a medida que aumentaba la altura mientras que la densidad básica disminuye con la altura. Esto se debe a la variación de la proporción de albura y duramen en las distintas alturas, y por la variación de la proporción de la madera juvenil en cada zona.

Cuadro N° 9: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en altura

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm³)		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
1	36	116	47	41	0,411	0,048	11,7
2	90	131	50	38	0,393	0,064	16,3
3	90	154	39	25	0,378	0,046	12,2
Promedio		138		35	0,394		13,4

En la primer troza existe cierta duraminización de la madera y una menor proporción de madera juvenil que en el resto de las trozas. Estas dos características hacen que el contenido de humedad se mantenga bajo y la menor proporción de madera juvenil hace que la densidad sea mayor que en las otras trozas. En contraposición la tercer troza posee poca o nada de madera duraminizada y presenta una alta proporción de madera juvenil, por lo que el contenido de humedad es más elevado y la densidad menor.

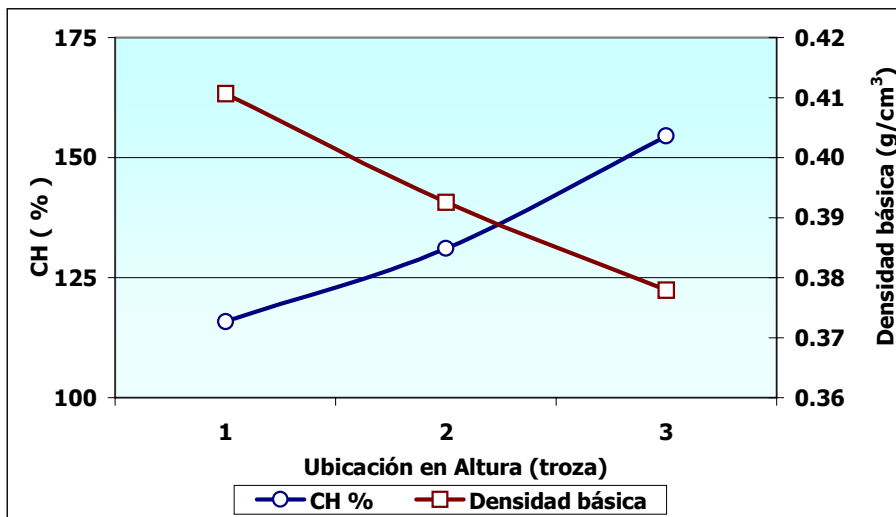


Gráfico N°5: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura

6.1.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura

Para ambas propiedades, el análisis por altura para cada una de las probetas (A, B y C) mostró que la tendencia de la variación en altura es igual para todas las ubicaciones en el radio, variando solo el valor absoluto de la propiedad para cada caso. Como se explicó anteriormente los altos valores de densidad en las probetas A está dado por su alto contenido de resina.

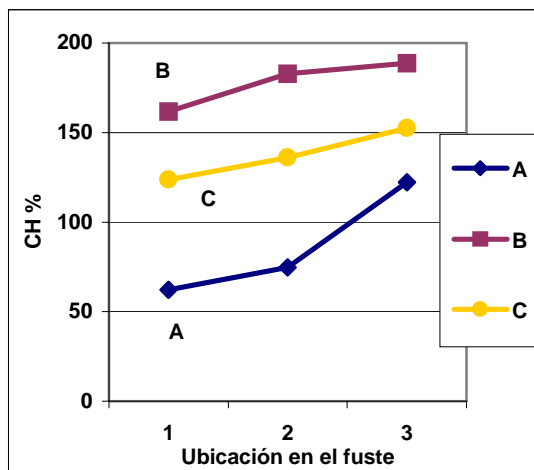


Gráfico N°6: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura

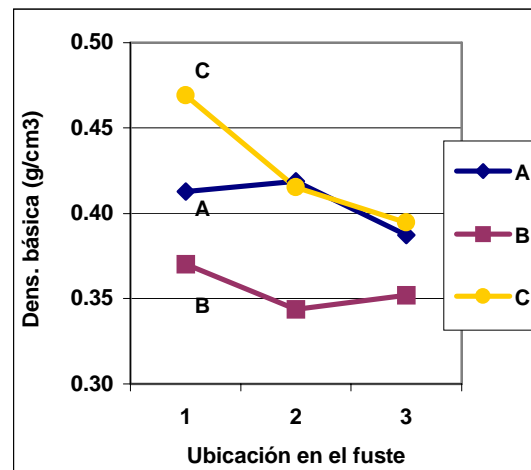


Gráfico N°7: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura

6.1.5. Módulo de Elasticidad de las trozas

El MOE promedio de las trozas analizadas (30 de cada altura) es de 7082 MPa, existiendo una dispersión importante de los valores individuales de las trozas. Existió un patrón de variación para las trozas dentro de un mismo árbol. El valor más alto se encuentra en la segunda troza siendo menores en la primera y tercera troza. Pensamos que se debe a lo siguiente: en el caso de la troza basal por la influencia de la madera producida en los primeros años y presencia de madera anormal en la base del árbol (primeros 70 cm según bibliografía), y en el caso de la tercer troza por la mayor proporción de madera juvenil.

Cuadro N° 10: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza

Árbol N°	MOE Trozas con corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
Media	6748	7806	6693	7082
Máximo.	9348	9765	9396	9323
Mínimo.	4839	5461	4358	5328
Desv std.	1162	1079	1108	984
CV %	17,2%	13,8%	16,5%	13,9%

La segunda troza muestra el MOE más alto, además de ser la de comportamiento más homogéneo. Esto nos llevaría a pensar que el promedio de las tablas de la segunda troza sería también más alto que el promedio de las tablas de la primera y tercera troza.

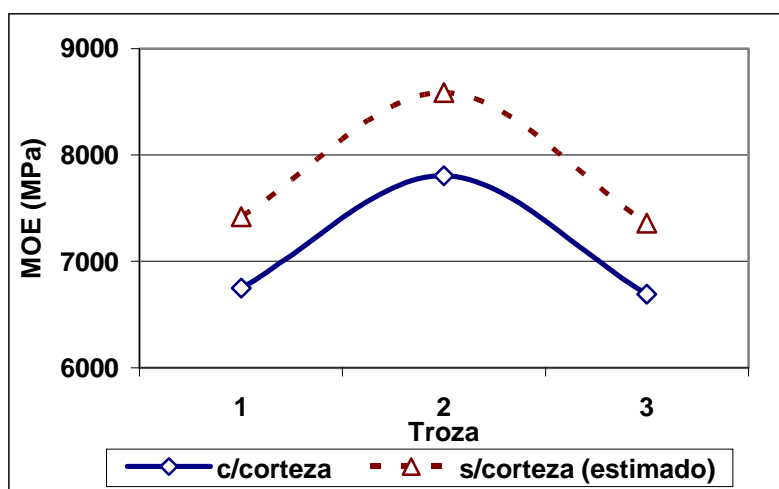


Gráfico N°8: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza y sin corteza (estimado), según posición en altura

En el gráfico de arriba se muestra el MOE con corteza y el MOE sin corteza estimado. Este último se estimó como un 10 % por encima del MOE con corteza ya que la relación entre el MOE realizado en las trozas con corteza y una vez descortezadas fue muy alta y mostró una diferencia entre ambos de aproximadamente un 10%. Esto es muy positivo ya que no sería necesario descortezar las trozas para estimar el MOE.

Cuadro N°11: MOE promedio con y sin corteza

	Con Corteza	Sin Corteza
MOE Promedio (MPa)	7082	8302

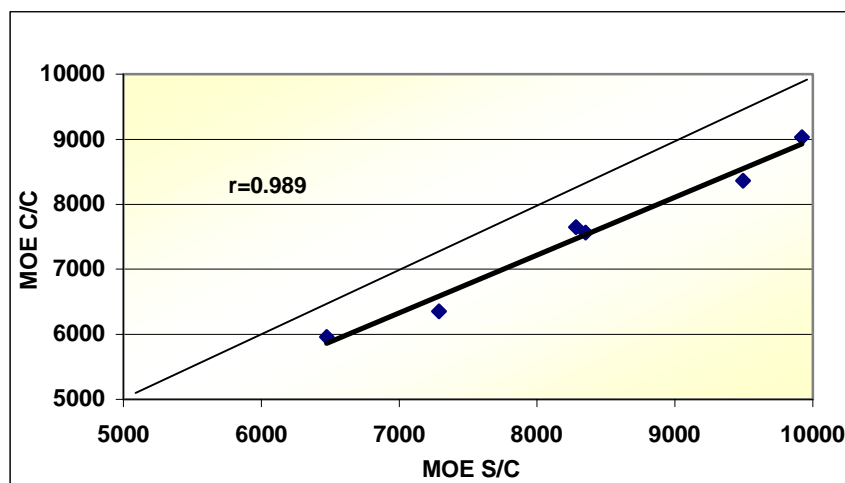


Gráfico N°9: Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza

No se encontró relación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento (expresado como DAP), por lo que se puede decir que para este caso la calidad de la madera no depende de la velocidad de crecimiento. Ver gráfico N°10.

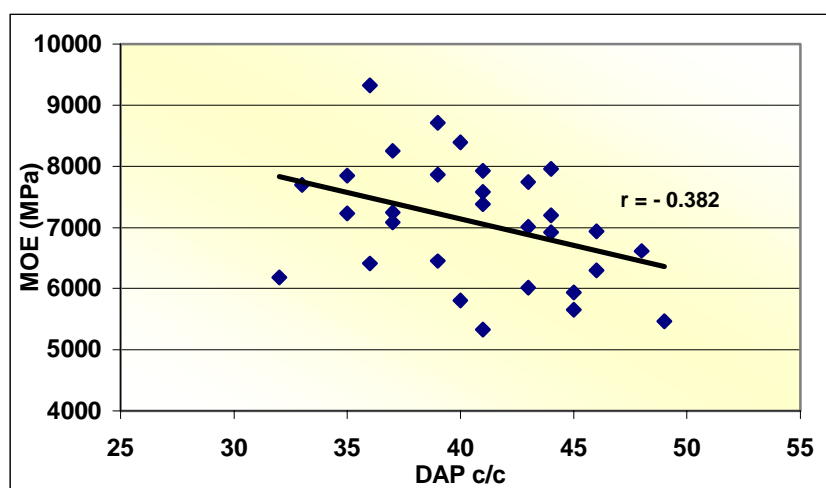


Gráfico N°10: Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada en DAP) y el MOE promedio

6.2 Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")

Los estudios realizados en tablas dimensionadas de 50mm x 150mm x 2.8m se pueden separar en dos tipos, ensayos no destructivos y ensayos destructivos. Como ensayo no destructivo se realizó la estimación del MOE mediante el método de la principal frecuencia de vibración con el FFT Analyzer. El ensayo destructivo fue el de flexión estática, se realizó en la máquina universal y se calcularon el MOE y el MOR.

Las tablas fueron secadas en horno industrial y posteriormente llevadas a las dimensiones finales. El contenido de humedad promedio fue de 10,5%.

6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas (solo B y C)

En el cuadro N° 12 se muestra los promedios de las propiedades estudiadas para las tablas B y C. En estos promedios no se incluyen las tablas A ya que estas deben ser descartadas para usos estructurales, como se mostrará en los capítulos siguientes.

Cuadro N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C)

	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máq. Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm³)
Número	130	130	130	126
Promedio	7630	7050	36,7	0,405
Máximo	12066	11380	68,5	0,529
Mínimo	3988	3207	8,2	0,330
STD	1639	1703	13,9	0,042
CV %	21,5	24,2	38,0	10,4

En el cuadro de arriba se pueden ver que los mínimos tanto para el MOE como para el MOR son bastante bajos. Esto se debe principalmente a las tablas provenientes de la tercera troza, en las que la proporción de madera juvenil es mayor (menor edad cambial).

Para el caso del MOE, la tercera troza tenía un diámetro menor que en ciertos casos dificultaba obtener las tres tablas, haciendo que no fueran tablas que pudieran ser ubicadas en forma clara dentro de una categoría. Muchas veces tablas B tenían parte de médula o en otros casos cantos muertos. Además estas trozas tienen una muy alta proporción de madera juvenil.

Para el caso del MOR las terceras trozas que no fueron podadas y además tienen las ramas basales normalmente más robustas que las superiores produciendo nudos muy grandes y fibras muy inclinadas en zonas puntuales que afectan en gran medida los valores de MOR, o ramas muertas produciendo nudos sueltos y en ciertos casos podridos. Estos defectos hacen que disminuya mucho el MOR promedio ya que esta propiedad es principalmente influida por los defectos de las tablas.

En la práctica, solo 5 de las 76 tablas analizadas de la tercer troza entran dentro de la clasificación de madera estructural según la norma JAS.

Si descartamos las terceras trozas para el uso estructural en base a lo fundamentado anteriormente, los promedios y otros parámetros estadístico obtenidos son los que se muestran en el cuadro siguiente.

Cuadro N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1° y 2° troza

	MOE (Máquina universal)	MOR	Densidad Corriente
número	78	78	75
Promedio	7637	41,9	0,417
Máximo	11380	68,5	0,529
Mínimo	4995	15,5	0,333
STD	1652	13,2	0,044
CV %	21,6	31,4	10,5

Teniendo en cuenta estas consideraciones se elevan los promedios y los valores mínimos que son los parámetros utilizados para los cálculos de estructuras. En definitiva estaríamos sugiriendo que tanto las tablas A de la primera y segunda troza como todas las tablas de la tercera troza no sean utilizadas como madera estructural.

6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas

Se realizó la comparación entre los resultados de ensayos de Módulo de Elasticidad mediante métodos no destructivos (FFT Analyzer) y destructivos (Máquina Universal). Se observó una muy buena correlación entre ambos, validando el uso del FFT Analyzer como forma de estimar el Módulo de elasticidad. Esto se puede observar en el gráfico 11.

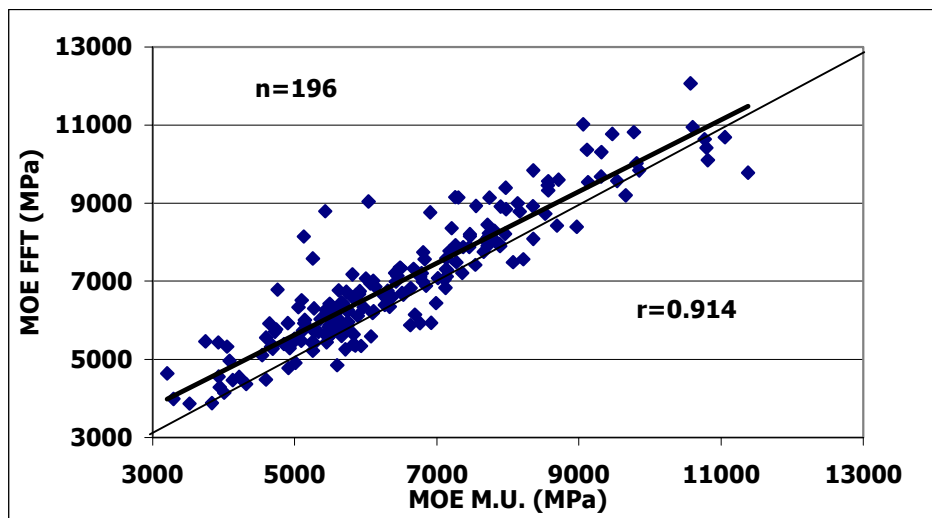


Gráfico N°11: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)

Para las tablas no se encontró una correlación clara entre el MOE y el MOR para las tablas, esto se debe a que el MOR esté muy influido por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el MOE, quien está más influido por las características de la madera y la edad cambial. Como se puede ver en el gráfico N° 12, para un valor de MOE (x.ej. 6000 MPa) existe una variación de valores de MOR (de 10 a 60 MPa).

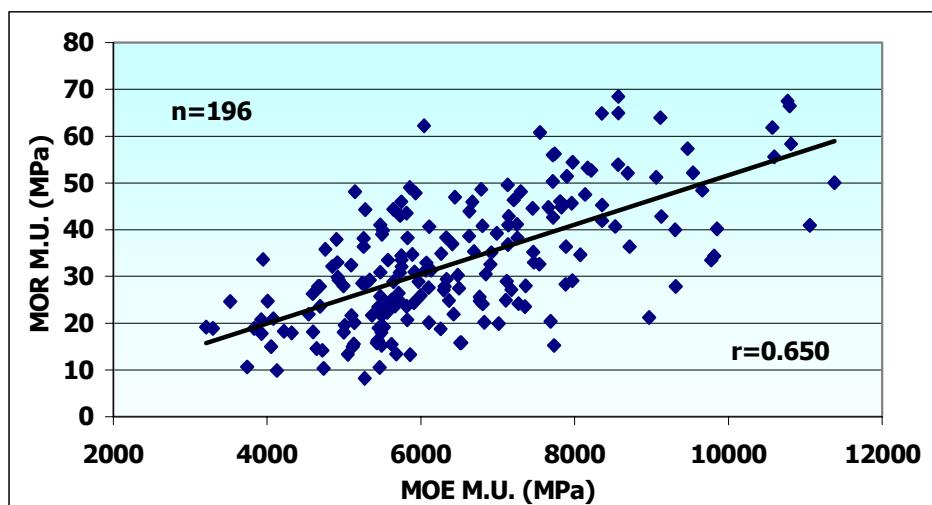
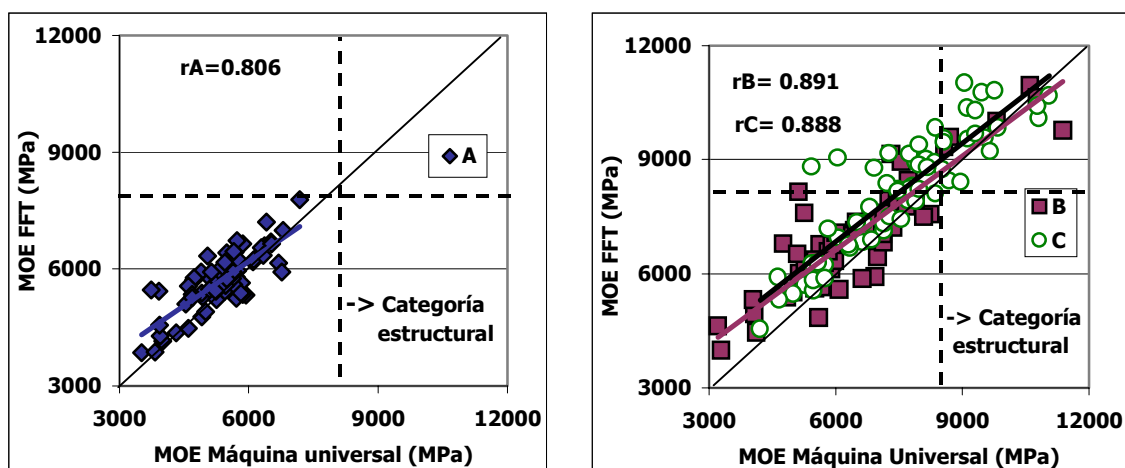


Gráfico N°12: Relación entre el MOR y el MOE

6.2.3 Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural



Gráficos N°13 y 14: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A" y en tablas "B y C"

En los gráficos 13 y 14 que se muestran arriba se relacionan el MOE calculado con la máquina universal y el MOE calculado con el FFT con el propósito de poder visualizar la magnitud y la dispersión de los valores de MOE para los distintos tipos de tablas. Por esta razón es que se agrupan a las tablas A en el gráfico 13 (a la izquierda) y a las tablas B y C en el gráfico 14 (derecha). En el primero se puede ver que las tablas A tienen siempre valores de MOE bajos y agrupados, no entrando en ningún caso en la categoría estructural según JAS, mientras que en el gráfico 14 se puede ver que tanto las tablas B como las C tienen una alta dispersión de sus valores de MOE. En este último caso se puede ver que en promedio las tablas C tienen valores de MOE más altos y que varias tablas B y C entran en la categoría estructural (la categorización de las tablas se analiza con más detalle en un capítulo posterior).

Por esta razón concluimos que en una clasificación para madera estructural, el primer paso sería descartar las tablas que tienen médula (Tablas A) o se encuentran muy próximas a la misma. Por el contrario no podemos concluir nada sobre las tablas B y C ya que tienen una alta dispersión, por lo que la selección debe ser en base a otros criterios. Como se vió que la tasa de crecimiento no influye en las propiedades, toda la variación se debe en la variabilidad entre árboles.

6.2.4 Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas

Se buscó analizar la relación de las propiedades mecánicas con la densidad corriente. Se realizaron análisis para el MOE y el MOR, no encontrando para ninguno de los casos una correlación significativa. Existe para un mismo valor de densidad una muy amplia dispersión de los valores en ambas propiedades mecánicas. Tampoco se encontró correlación si se analizan las distintas probetas por separado o agrupándolas, como muestra el gráfico 15.

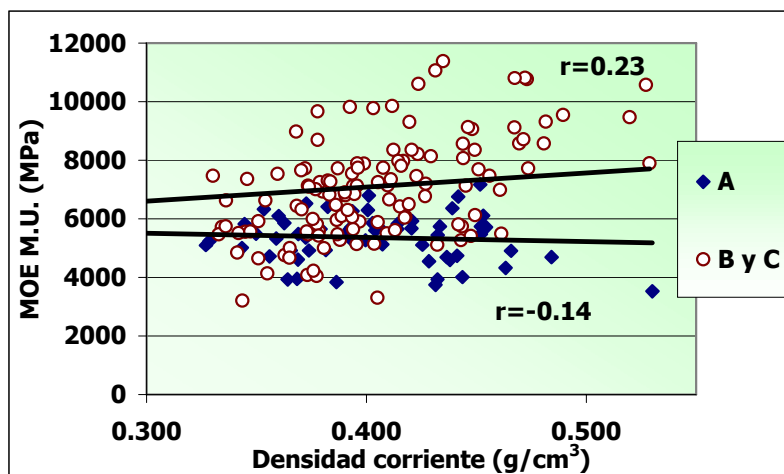


Gráfico N°15: Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)

6.2.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio

La variación de las propiedades mecánicas en el radio muestra una tendencia muy clara. Todas las propiedades aumentan a medida que se alejan de la médula o se acercan a la corteza. Es decir, la madera juvenil tiene valores menores para todas las propiedades mecánicas que la madera adulta.

Las tablas C son las que presentaron los mayores valores para las propiedades mecánicas y las A (madera juvenil) fueron las que presentaron los menores valores confirmando que no son adecuadas para uso estructural.

Cuadro N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio

	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Maquina. Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm ³)
A	5722	5380	26	0,391
B	7106	6579	33	0,398
C	8171	7535	40	0,387

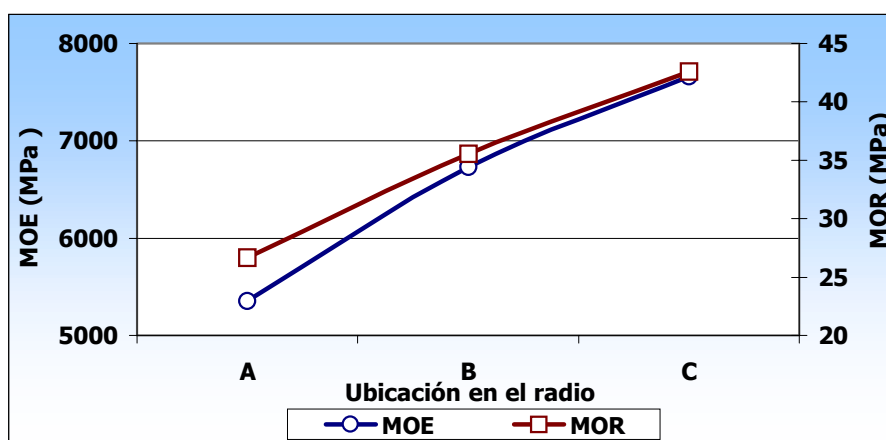


Gráfico N°16: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio

6.2.5.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Si se analiza la variación en el radio de las propiedades para las distintas alturas por separado, el comportamiento encontrado es el mismo para todas las alturas e igual al promedio. No importando la altura las tablas C son superiores, o dicho en otras palabras cuanto más edad cambial tiene la madera, mayores son sus propiedades mecánicas.

Los valores de las propiedades para las tablas A son bastante constantes con la altura mientras que en las tablas B y C las propiedades de las tablas de la troza basal superaron a las de las segundas trozas y estas a la vez fueron mayores que las de las terceras. Esto se debe a que cuanto más abajo están ubicadas las tablas, corresponde a madera de mayor edad, o con menor proporción de madera juvenil. En la troza basal las tablas C tenían en promedio madera de 16 años, en la segunda troza de 13 años y en la tercera de 11.

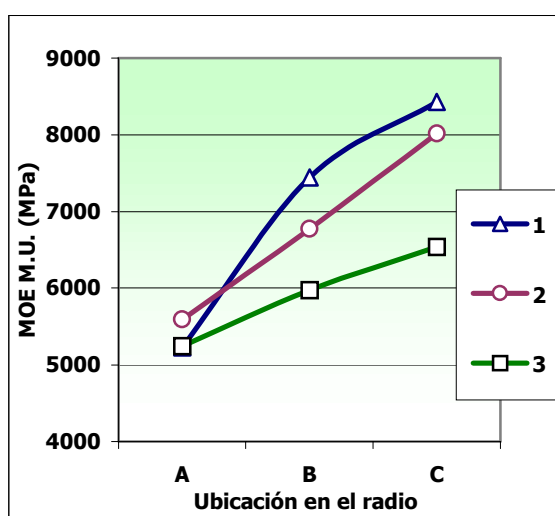


Gráfico N°17: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

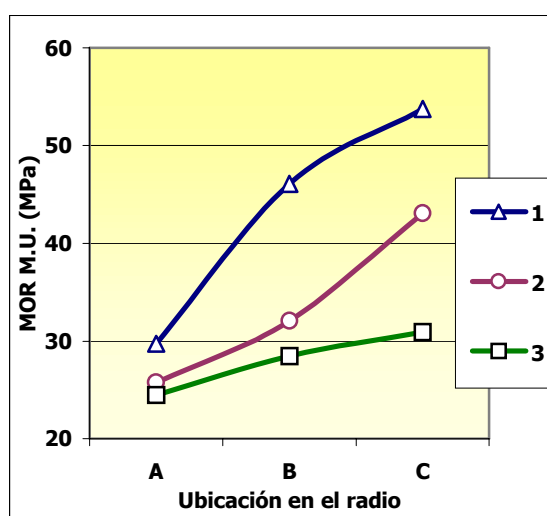


Gráfico N°18: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

6.2.6 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura

Para el promedio de las tablas los valores del MOE y MOR disminuyen con la altura. La magnitud de las propiedades es más alta en la troza basal, siendo menor en la segunda troza y menor aún en la tercera.

Cuadro N° 15: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en altura

Altura	Número De tablas	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máquina Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm ³)
1	35	7369	6995	43	0,443
2	83	7256	6837	34	0,381
3	76	6552	5901	28	0,380

Se puede ver en el cuadro N° 15 que la altura afecta en mayor medida a la magnitud del MOR que al MOE.

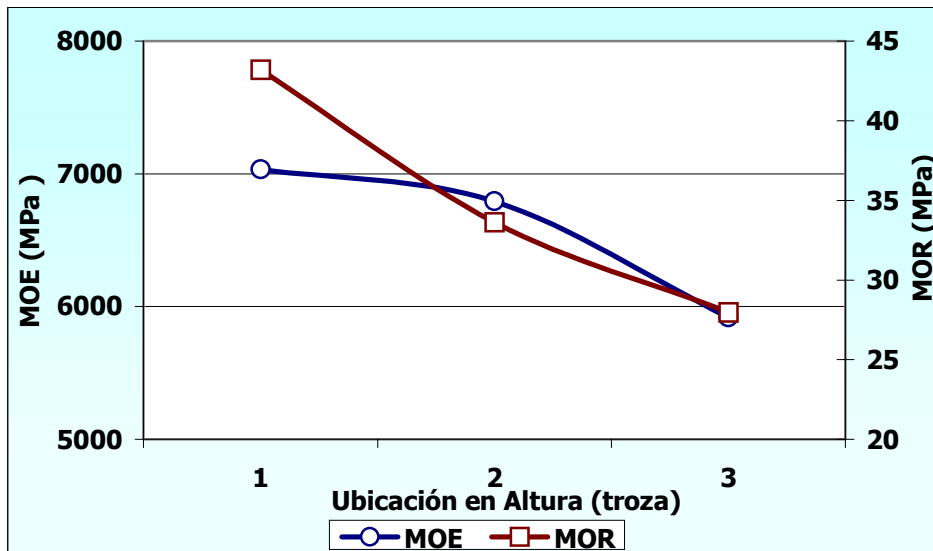


Gráfico N°19: MOE y MOR según ubicación en altura

6.2.6.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación en altura para cada una de las ubicaciones en el radio, obtenemos un comportamiento similar al promedio. Para todas las ubicaciones en el radio, las propiedades mecánicas disminuyen a medida que aumenta la altura. Este comportamiento no es tan claro en las probetas A en las que las magnitudes de las propiedades son muy similares para todas las alturas ya que las mismas son todas de igual edad cambial, madera de hasta 4 años.

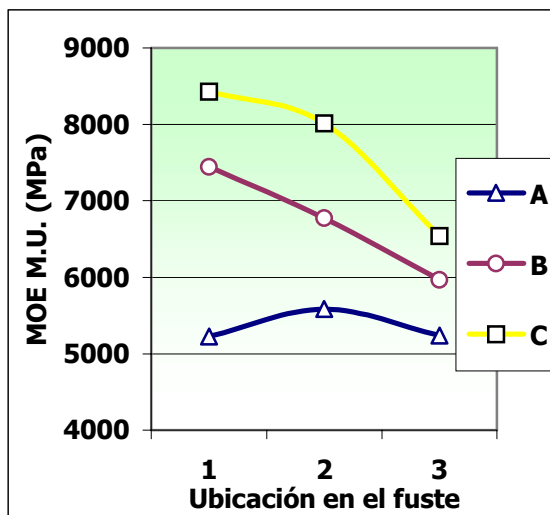


Gráfico N°20: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

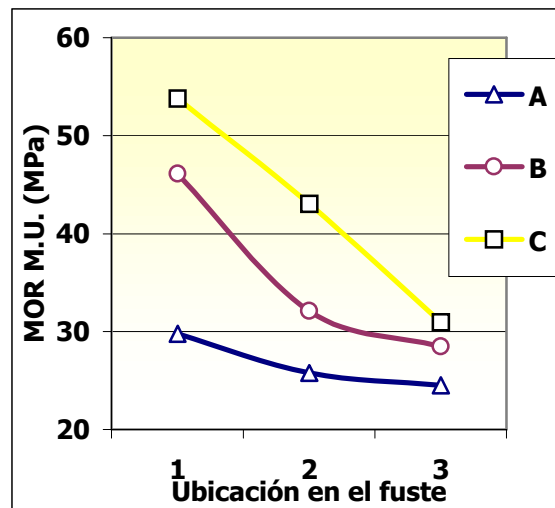


Gráfico N°21: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

6.2.7 Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas

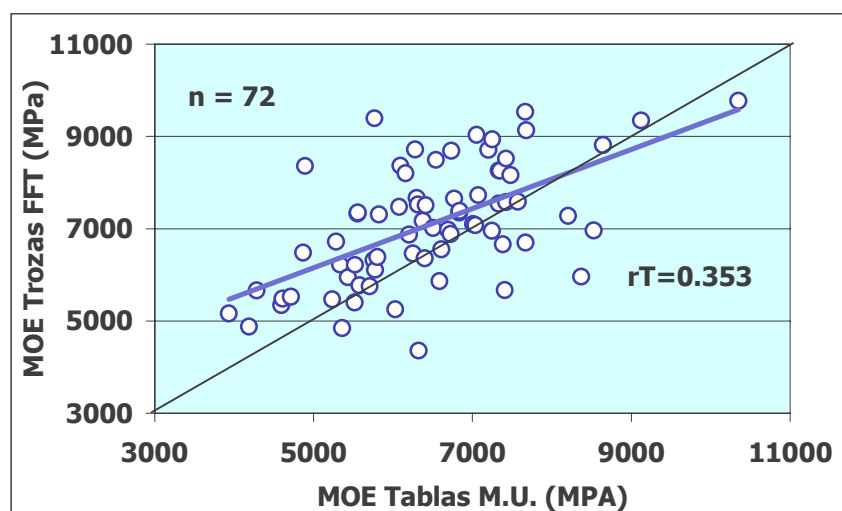


Gráfico N°22: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas

No encontramos ninguna relación entre el MOE de las trozas calculado con el FFT Analyzer y el MOE promedio de sus tablas, como se puede ver en el gráfico de arriba. Haciendo el análisis por troza encontramos que para la primera y segunda troza había una correlación aceptable ($r=0.78$ y $r=0.74$) mientras que para la tercer troza no había correlación ($r=0.39$). El problema es que en estudios realizados en otros pinos no se repitió este comportamiento por lo que no es generalizable.

Los resultados obtenidos por el Proyecto LATU-JICA en trozas basales (Pérez de Castillo Informe de Investigación N°7 *Pinus elliottii*, Agosto 2001) y los que se puede ver en la bibliografía muestran que existe cierta correlación entre el MOE de las trozas y el de las tablas. Una posible explicación de que nuestros resultados no muestren lo mismo es que se obtuvieron solo tres tablas de cada troza, por lo que el promedio de las mismas puede no ser representativo de la madera de la troza.

6.2.8 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS

En los cuadros 16 y 17 que se presentan abajo se muestra la clasificación de las Tablas según las Normas JAS (Japan Agricultural Standard) para madera Estructural de coníferas. Según dichas normas a partir de las categorías E90 inclusive, la madera puede ser utilizada con fines estructurales para la construcción.

Para el caso del *Pinus elliottii* en estudio, el 20% de las tablas se encontraron en la categoría E90 o mayor.

Cuadro N° 16: Proporción de tablas según categoría JAS

Categoría	MOE	MOE	Promedio Tablas	
	10 ³ kgf/cm ²	(MPa)	Cantidad (193)	Proporción
<E 50			5	0,03
E 50	40-60	3920-5880	81	0,42
E 70	60-80	5880-7850	69	0,36
E 90	80-100	7850-9810	29	0,15
E 110	100-120	9810-11770	9	0,05

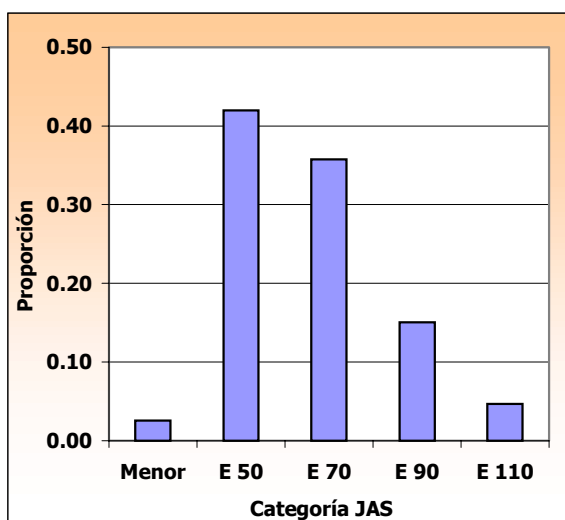


Gráfico N°23: Proporción de tablas ensayadas según categoría JAS

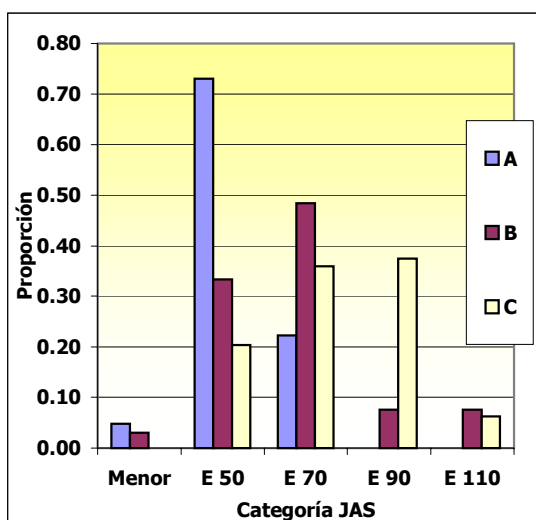


Gráfico N°24: Proporción de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS

A continuación se muestra la misma clasificación por tipo de tabla (A, B y C). En esta clasificación se puede ver que la mayoría de las tablas que pueden ser usadas como madera estructural para la construcción según la norma JAS corresponden a tablas C. Algunas tablas B también entran como madera estructural según JAS, mientras que todas las tablas A quedan fuera de la misma.

Cuadro N° 17: Proporción de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE (MPa)	Tabla A		Tabla B		Tabla C	
			Cant	Prop	Cant	Prop	Cant	Prop
< E 50			3	0,05	2	0,03		0,00
E 50	40-60	3920-5880	46	0,73	22	0,33	13	0,20
E 70	60-80	5880-7850	14	0,22	32	0,48	23	0,36
E 90	80-100	7850-9810		0,00	5	0,08	24	0,38
E 110	100-120	9810-11770		0,00	5	0,08	4	0,06
Proporción de tablas de categoría estructural				0,00		0,15		0,44

Si no se consideran las tablas de la tercer troza la proporción de tablas de categoría estructural para las tablas B es de 0,23 y la de las tablas C de 0,60.

6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos

A partir de las tablas ensayadas anteriormente se obtuvieron probetas libres de defectos, a las que se le realizaron una serie de ensayos mecánicos. Estos ensayos fueron: flexión dinámica a partir del que se obtuvo la resistencia al impacto, flexión estática a partir del cual se obtuvieron el MOE y el MOR, y el ensayo de dureza.

Recordemos que se analizaron 12 trozas basales 30 segundas trozas y 30 terceras trozas.

6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara para llevarlas a un contenido de humedad cercano a 12%. El contenido de humedad promedio al momento del ensayo fue de 10,9%. Los cuadros 18 y 19 que siguen muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las probetas provenientes de todas las tablas, A, B y C.

Tabla N° 18: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas

	FLEXIÓN ESTÁTICA			
	MOE	MOR	Densidad Corriente	Contenido de Humedad
	(MPa)	(MPa)	(g/cm ³)	(%)
Número	194	194	196	196
MEDIA	6699	63,0	0,394	10,9
Máximo	11758	98,0	0,564	12,8
Mínimo	2814	33,4	0,314	9,3
Desvío std	1776	12,3	0,044	0,6
CV (%)	26,5	19,5	11,6	5,1

Cuadro N° 19: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas

	FLEXIÓN DINÁMICA	DUREZA JANKA		
	Resistencia al Impacto	Radial	Tangencial	Transversal
	(J/cm ²)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Número	195	196	196	15
MEDIA	2,48	24,2	26,7	33,8
Máximo	4,91	58,8	55,0	45,0
Mínimo	0,73	13,8	15,1	26,7
Desvío std	0,88	6,2	6,3	5,5
CV (%)	35,5	25,7	23,5	15,2

En las durezas se observa que la dureza transversal es mayor que la tangencial y esta a su vez es mayor que la radial. Esto concuerda con la bibliografía y se presenta como una relación bastante constante.

6.3.2 Variación de las propiedades mecánicas según su ubicación en el radio

A continuación se presenta un análisis de la variación de las propiedades en función de la ubicación en el radio.

De manera similar a lo observado para las tablas, la variación de las propiedades mecánicas en el radio muestra una tendencia muy clara. Todas las propiedades aumentan a medida que se alejan de la médula. Es decir aumentan a medida que aumenta la edad de la madera.

Cuadro N° 20: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Corriente (g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
A	66	6203	25,0	59,6	15,7	0,378	11,2
B	65	6538	25,8	61,0	21,7	0,383	11,5
C	64	7476	26,4	69,1	20,8	0,407	11,0

Cuadro N° 21: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm ²)		Dureza Janka radial (MPa)		Dureza Janka tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
A	66	2,10	32,4	22,8	21	26,1	28
B	65	2,62	33,6	23,9	31	28,4	31
C	64	2,68	37,5	26,0	23	29,0	29

En los gráficos que se muestran a continuación (Gráficos N° 25, 26 y 27) se ilustra la tendencia de las propiedades en función del radio. Para todas ellas hay un aumento en su magnitud a medida que se alejan de la médula.

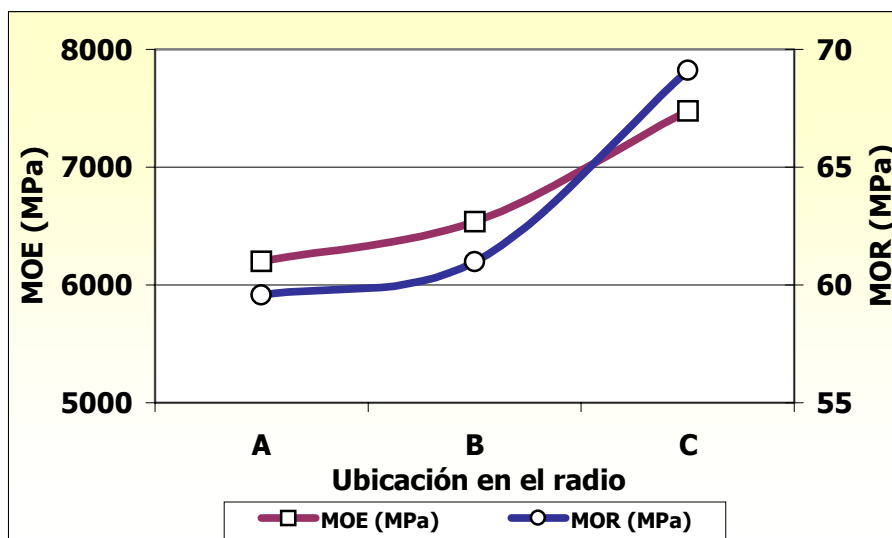


Gráfico N° 25: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio

Tanto para el MOR como para el MOE, el incremento es leve entre la probeta A y la probeta B, aumentando marcadamente hacia la probeta C. Para la resistencia al Impacto el comportamiento es distinto, produciéndose el mayor incremento entre las probetas A y B, creciendo luego en forma muy leve entre la probeta B y C.

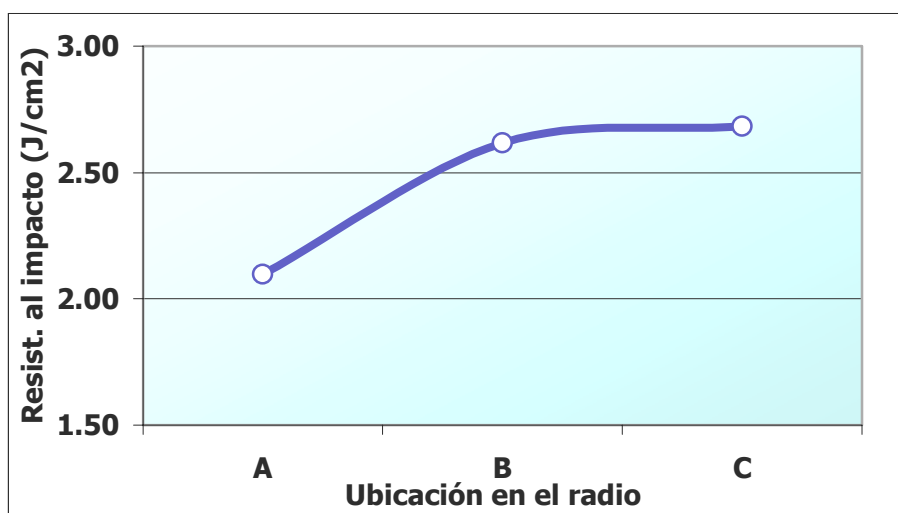


Gráfico N° 26: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio

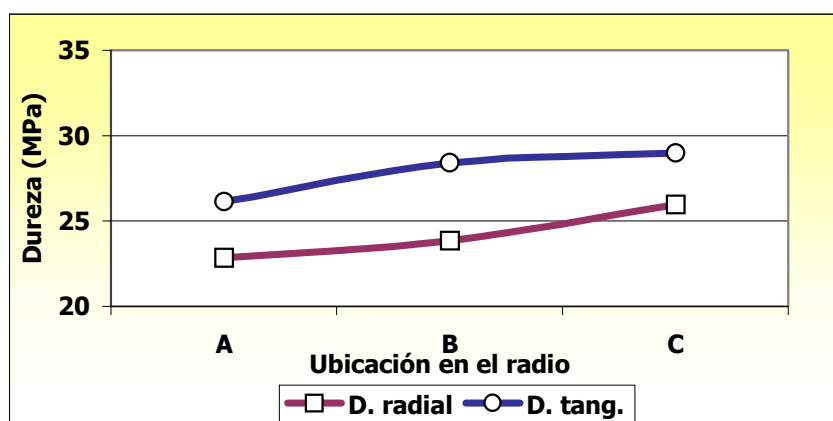


Gráfico N° 27: Dureza radial y tangencia promedio según ubicación en el radio

6.3.3. Variación de las propiedades mecánicas en la altura

La variación de las propiedades mecánicas en altura no se comporta en forma tan homogénea como en el radio, pero en general se observa que las magnitudes de las propiedades disminuyen en cuanto aumenta la altura.

Cuadro N° 22: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura

Troza	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Corriente (g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	34	6545	32	67	22	0,422	13,8
2	83	7192	23	64	19	0,392	9,7
3	78	6299	23	60	18	0,370	8,4

Cuadro N° 23: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura

Troza	N°	Resistencia al Impacto (J/cm ²)		Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka Tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	34	2,5	45,5	28,4	6,6	32,1	7,2
2	83	2,7	29,6	23,2	4,9	26,0	5,6
3	78	2,2	30,8	23,3	4,7	24,9	5,2

Los comportamientos más extraños los presentan el MOE y la resistencia al impacto en la troza basal. Esto puede estar dado por el hecho de que no se identificó de que parte de la tabla se extrajeron las probetas, es decir pueden haberse extraído tanto a 3 m de altura, como de la base del árbol. En la parte basal del árbol (primeros 70 cm) según la bibliografía existe una zona en que hay presencia de madera anormal, cuyas propiedades físicas y mecánicas son distintas a las del resto del árbol, normalmente las últimas son de menor magnitud.

Tanto para el MOR como para la dureza la evolución de las propiedades en altura presenta una tendencia más clara, que es una disminución de su magnitud a medida que aumenta la altura.

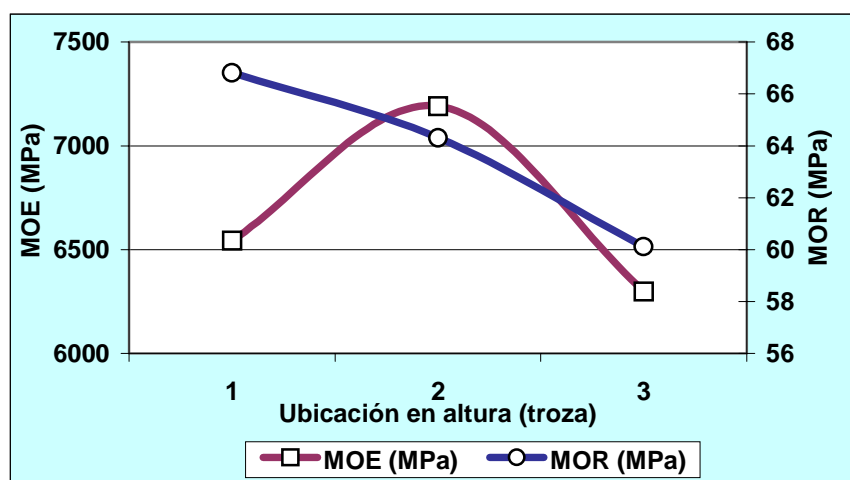


Gráfico N° 28: MOE y MOR promedio según ubicación en altura

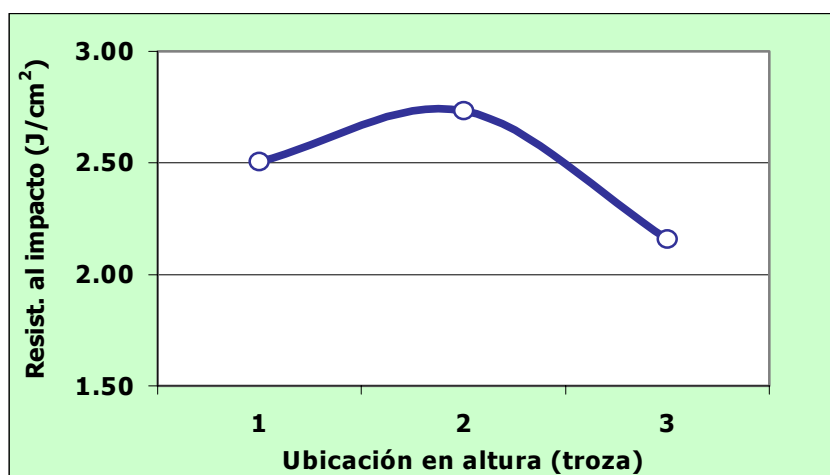


Gráfico N° 29: Resistencia al Impacto según ubicación en altura

La menor magnitud de las propiedades en la tercer troza se debe a que en la misma existe una mayor proporción de madera juvenil y que debido a la presencia de nudos más grandes en las tablas, lleva a que en las probetas clear obtenidas a partir de ella pueda existir una mayor ocurrencia de grano inclinado. Esta última característica afecta a todas las propiedades pero en mayor medida la resistencia al impacto

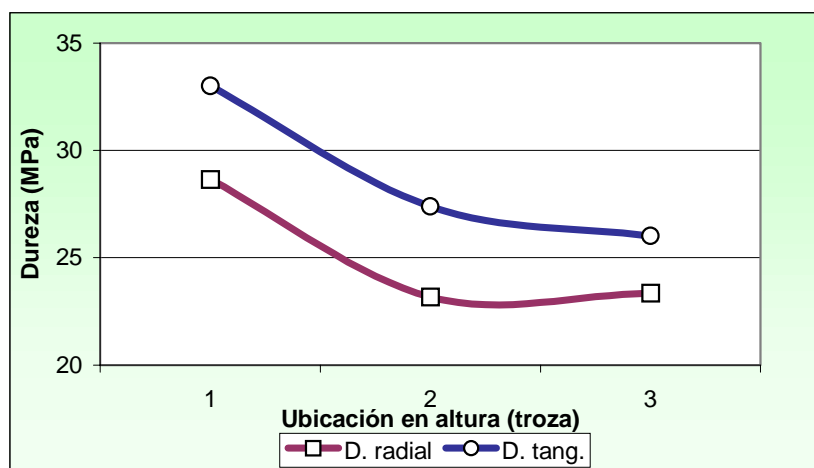


Gráfico N° 30: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en altura

6.3.4. Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación el el radio

En este capítulo se busca analizar la variación de las propiedades en el radio para cada una de las alturas consideradas. En general la tendencia para todas las alturas es similar a la tendencia promedio, correspondiendo las menores magnitudes a la madera juvenil (probetas A) y aumentando con la edad.

Se puede observar que para la mayoría de los casos la tendencia más marcada corresponde a la troza basal, cosa que es muy razonable ya que en esta troza, por ser la de mayor edad, es donde van a existir mayores diferencias de edad de la madera de las distintas probetas. En el otro extremo está la troza tres que es de menor edad, en la que las magnitudes de las propiedades se parecen por que las probetas están más próximas y compuestas por madera de más parecida edad. Tiene una alta proporción de madera juvenil. En esta troza sucede que ciertas probetas C contienen madera de similar edad que la probeta B de la primera troza.

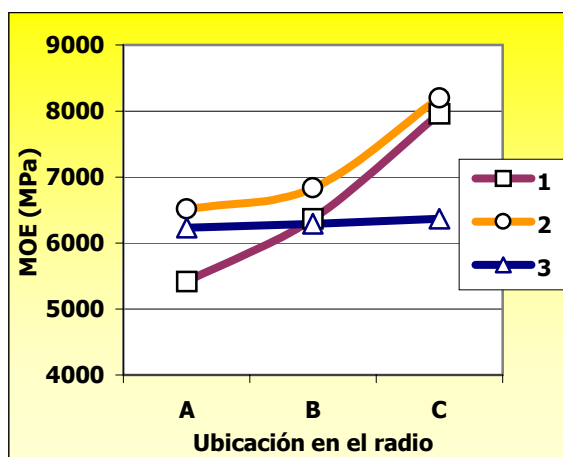


Gráfico N° 31: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

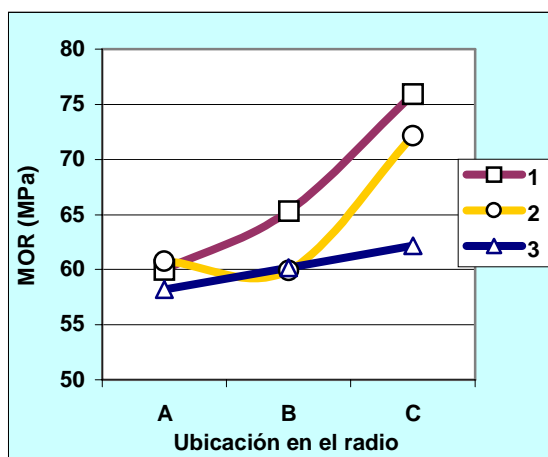


Gráfico N° 32: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

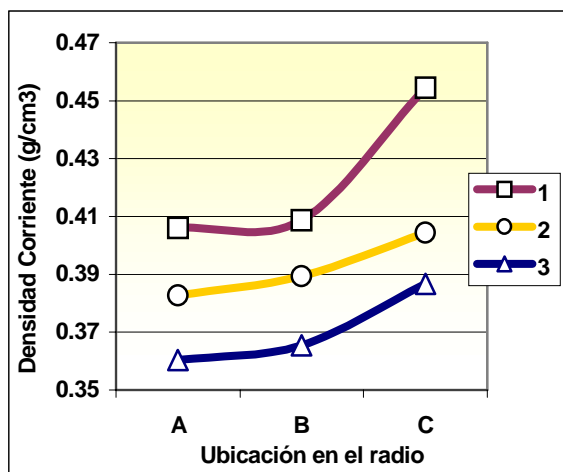


Gráfico N° 33: Densidad corriente por altura según ubicación en el radio

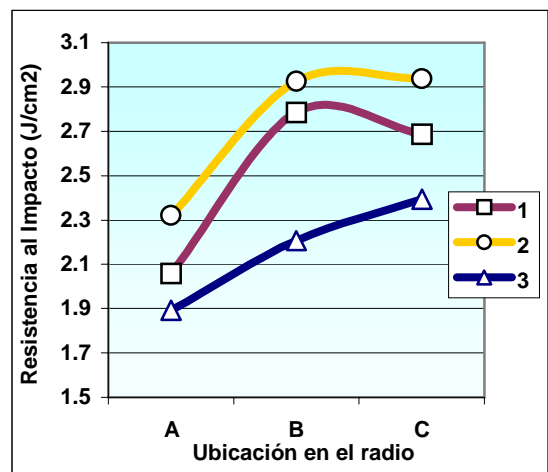


Gráfico N° 34: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio

En la dureza existe una diferencia muy marcada entre las distintas trozas, siendo la troza basal claramente superior a las otras.

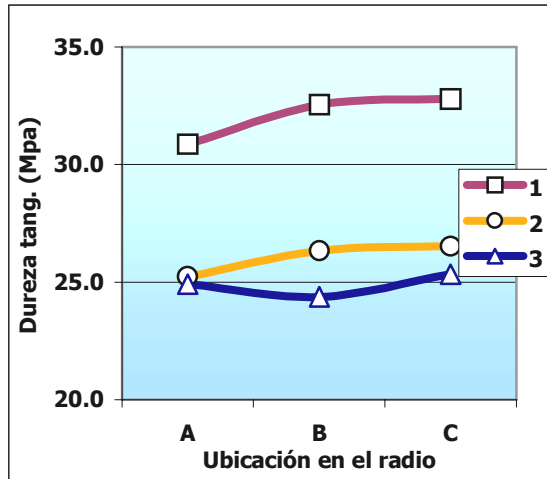


Gráfico N° 35: Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio

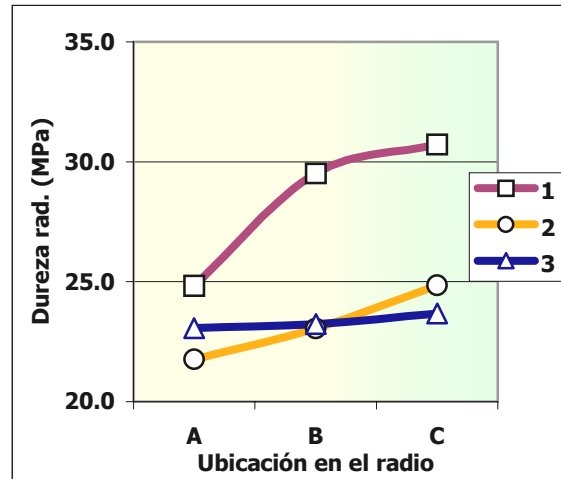


Gráfico N° 36: Dureza radial por altura según ubicación en el radio

6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura

El siguiente es un análisis de las variaciones de las propiedades mecánicas de las probetas para cada uno de las ubicaciones en el radio.

Se puede observar que para todas las propiedades, las probetas C tienen las mayores magnitudes, para todas las alturas analizadas. Esta diferencia se van acortando con la altura desapareciendo o siendo poco claras para la tercera troza, básicamente por la edad de la troza a los 11 m de altura en la que existe un alto porcentaje de madera juvenil (razones expuestas en el capítulo anterior).

Por el contrario para todos los casos las probetas A son las que tienen los menores valores para todas las propiedades mecánicas.

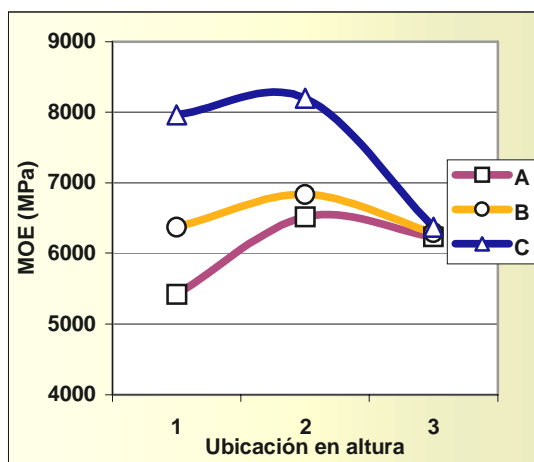


Gráfico N° 37: MOE promedio por ubicación en el radio según altura

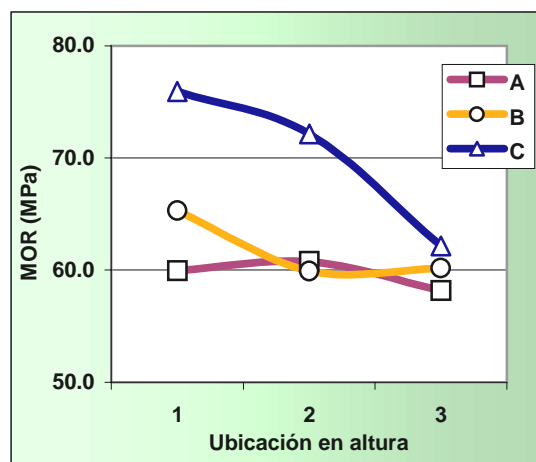


Gráfico N° 38: MOR promedio por ubicación en el radio según altura

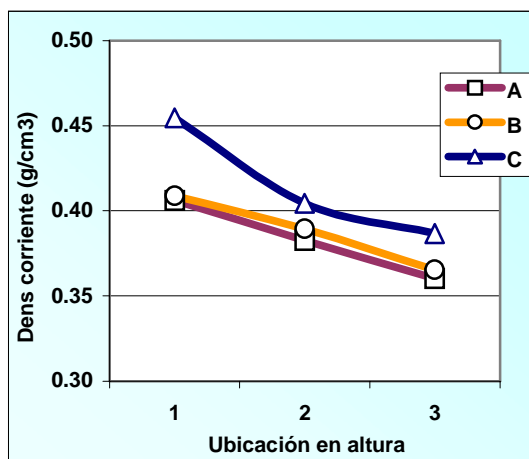


Gráfico N° 39: Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura

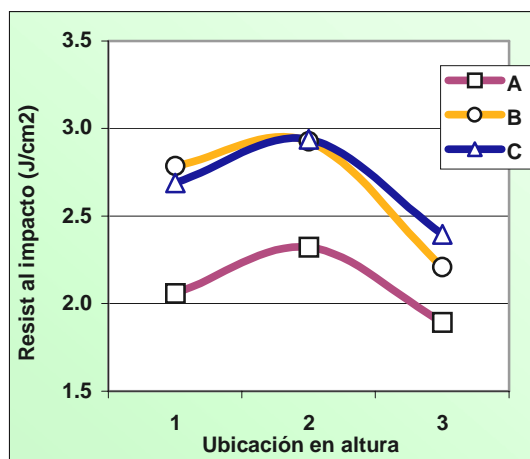


Gráfico N° 40: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

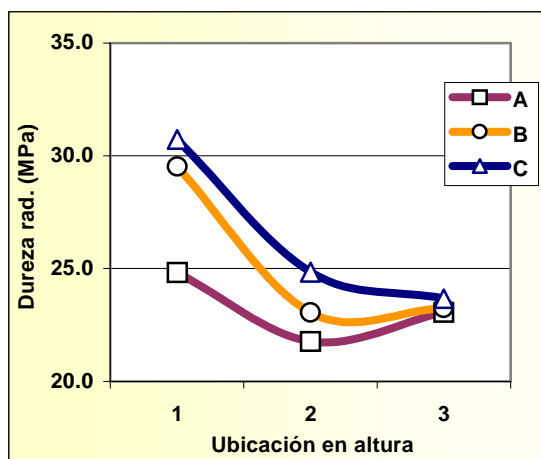


Gráfico N° 41: Dureza radial por ubicación en el radio según altura

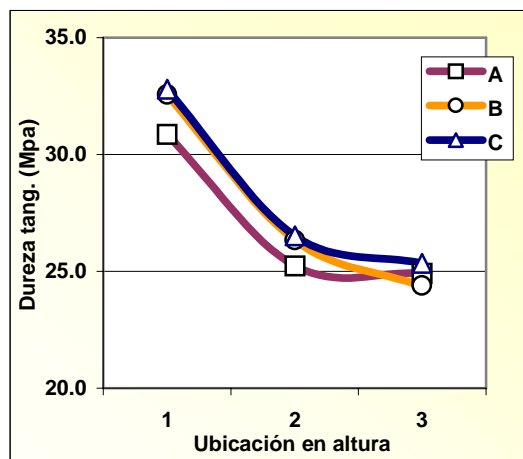


Gráfico N° 42: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura

6.3.6 Relación entre las distintas propiedades

Se buscaron analizar las correlaciones entre las distintas propiedades mecánicas y entre estas y la densidad corriente. A continuación se muestran los coeficientes de correlación r entre las distintas propiedades.

Cuadro N° 24: Relaciones entre las distintas propiedades

N = 196	MOE	MOR	Resistencia al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Densidad Corriente
MOE	1	0,828	0,133	0,047	0,033	0,430
MOR		1	0,313	0,215	0,152	0,641
Resistencia al Impacto			1	0,135	0,176	0,502
Dureza Radial				1	0,539	0,261
Dureza Tangencial					1	0,250
Densidad Corriente						1

Como se puede ver en el cuadro anterior las únicas propiedades con cierta correlación entre si son el MOE y el MOR. Las otras propiedades no están correlacionadas entre si o lo están en una forma muy leve como la dureza radial y la dureza tangencial.

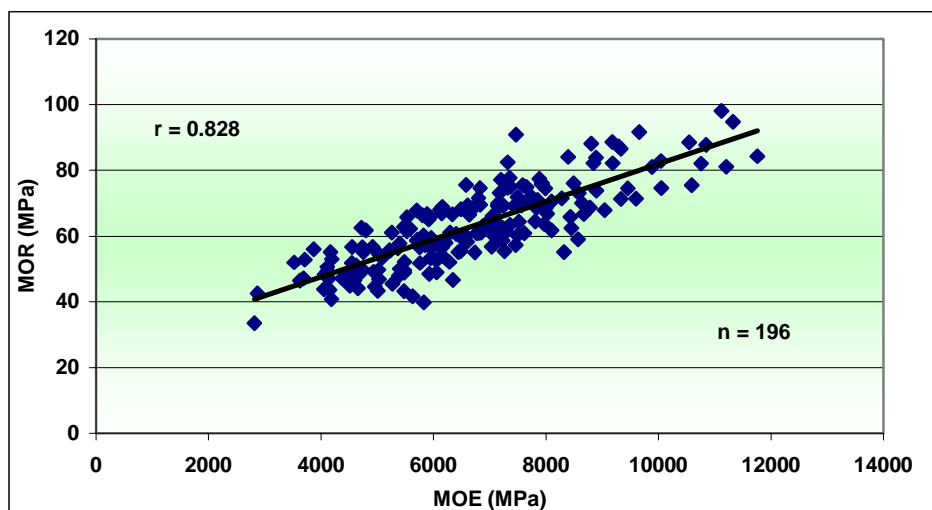


Gráfico N° 43: Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos

6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos

Esta relación se analizó solo para las tablas B y C dado que como se muestra a lo largo del informe, las Tablas A no deben ser consideradas para usos estructurales.

Cuadro N° 25: Relación entre las propiedades mecánicas de tablas y las pequeñas probetas libres de defectos

Probeta N°	FLEXIÓN ESTÁTICA PROBETAS B Y C			
	Probetas libres de defectos		Tablas	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	127	127	129	129
Media	6988	65,1	7023	36,6
Máximo	11758	98,0	11380	68,5
Mínimo	3524	39,8	3207	8,2
Desvío std	1807	13,0	1693	14,1
CV (%)	25,9	20,0	24,1	38,5

Se encontró cierta relación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear que se obtuvieron de las mismas. A partir de esto y de acuerdo con la bibliografía consultada podemos decir que el MOE es una propiedad que no es influida en gran medida por los nudos de la tabla sino que depende de las características de la madera.

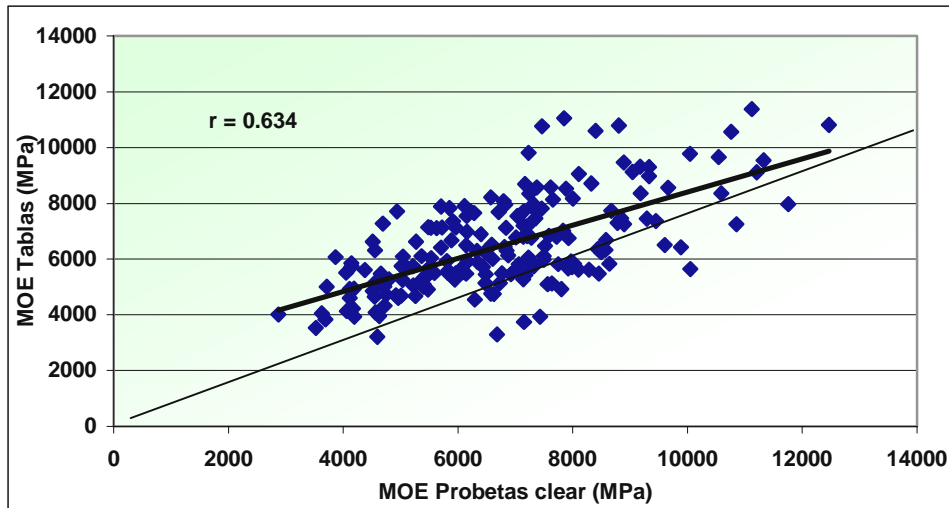


Gráfico N° 44: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

En el caso del MOR, no se observó correlación entre los valores encontrados en tablas y en sus pequeñas probetas. Esto se debe a que el MOR depende en gran medida de los defectos de las tablas, como los nudos y el grano inclinado.

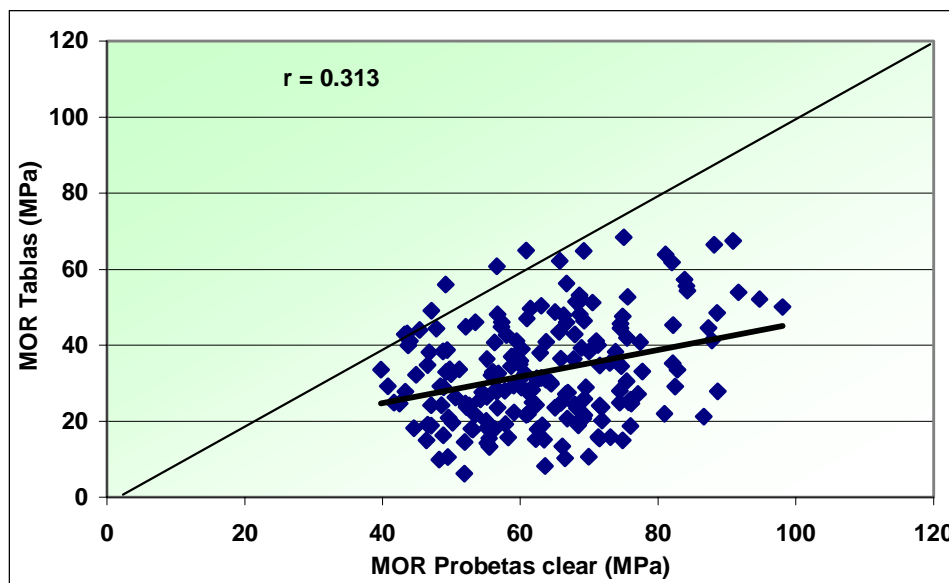


Gráfico N° 45: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

FICHA TECNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Especie : *Pinus elliottii* Eng.

Ensayos realizados en 30 árboles de 24 años de edad

Localidad de origen : Río Negro

Propiedades Físicas

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm ³	0,391
Densidad Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm ³	0,404

Propiedades Mecánicas

En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 10.5%
(Tablas B y C de las 1^{ras} y 2^{das} trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	8125	Kgf/cm ²	82852
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	7637	Kgf/cm ²	77876
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	41,9	Kgf/cm ²	427

En pequeñas probetas libres de defectos – CH = 10.9%

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	7400	Kgf/cm ²	75459
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	67,6	Kgf/cm ²	689
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm ²	2,9	Kgf.m/cm ²	0,30
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	26,0	Kgf	265
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	28,2	Kgf	288
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	33,8	Kgf	345

TABLA DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

DE:	A:	Factor
Pascal (Pa)	Kgf/cm ²	1,0197E-05
Mega Pascal (MPa)	Kgf/cm ²	10,1972
Joule (J)	Kgf.m/cm ²	0,1020
Newton (N)	Kgf	0,1020
g/cm ³	lbs/ft ³	62,4280
Pascal (Pa)	lbs/in ² (psi)	1,450E-04
Mega Pascal (MPa)	lbs/in ² (psi)	1,450E+02

Solo para Dureza Janka

Mega Pascal (MPa)	kN	0,1000
Mega Pascal (MPa)	Kgf	10,1972

Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos

Figuras	Página
N° 1: Muestreo y distribución de las trozas _____	2
N° 2: Orden en la realización de los trabajos _____	3
N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	4
N° 4: Determinación Módulo de Elasticidad mediante FFT Analyzer _____	5
N° 5 y 6: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trozas____	6
N° 7 y 8: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6") _____	6
N° 9: Continuación de los ensayos en tablas 2"x 6" _____	7
N° 10: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	8
N° 11: Ensayos en pequeñas probetas libres de defectos _____	10
N° 12: Esquema y ensayo de Flexión Estática en tres puntos _____	10
N° 13: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	11
N° 14: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	12

Cuadros	Página
N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	2
N° 2: Datos técnicos del rodal _____	2
N° 3: Podas realizadas _____	2
N° 4: Raleos realizados _____	3
N° 5: Grados de clasificación de las trozas _____	3
N° 6: Proporción de las trozas según la categoría a la que pertenecen _____	12
N° 7: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Básica _____	13
N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio _____	14
N° 9: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en altura _____	15
N° 10: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza _____	17
N° 11: MOE promedio con y sin corteza _____	17
N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C) _____	19
N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1° y 2° troza _____	19
N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio _____	22
N° 15: Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura _____	23
N° 16: Proporción de tablas según categoría JAS _____	25
N° 17: Proporción de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	26
N° 18: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	27
N° 19: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	27
N° 20: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	27
N° 21: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	28
N° 22: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	29
N° 23: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	29
N° 24: Relación entre las distintas propiedades _____	33
N° 25: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las probetas clear _____	34

Gráficos	Página
N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación radial _____	14
N° 2: Densidad Básica según anillo medio de la probeta _____	14
N° 3: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio _____	15
N° 4: Densidad Básica por altura según ubicación en el radio _____	15
N° 5: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura _____	16
N° 6: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura _____	16
N° 7: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura _____	16
N° 8: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza y sin corteza (estimado) según posición en altura _____	17

Gráficos (continuación)		Página
N° 9:	Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza _____	18
N° 10:	Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE promedio _____	18
N° 11:	Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer) _____	20
N° 12:	Relación entre el MOR y el MOE _____	20
N° 13 y 14:	Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A" y en tablas "B y C" _____	21
N° 15:	Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal) _____	22
N° 16:	Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio _____	22
N° 17:	MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	23
N° 18:	MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	23
N° 19:	MOE y MOR según ubicación en altura _____	24
N° 20:	MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	24
N° 21:	MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	24
N° 22:	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas _____	25
N° 23:	Proporción de tablas según categoría JAS _____	26
N° 24:	Proporción de tablas por tipo según categoría JAS _____	26
N° 25:	MOE y MOR promedio según ubicación en el radio _____	28
N° 26:	Resistencia al Impacto según ubicación en el radio _____	28
N° 27:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio _____	29
N° 28:	MOE y MOR promedio según ubicación en altura _____	30
N° 29:	Resistencia al Impacto según ubicación en altura _____	30
N° 30:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio _____	30
N° 31:	MOE promedio por altura según ubicación en el radio _____	31
N° 32:	MOR promedio por altura según ubicación en el radio _____	31
N° 33:	Densidad corriente por altura según ubicación en el radio _____	31
N° 34:	Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio _____	31
N° 35:	Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio _____	32
N° 36:	Dureza radial por altura según ubicación en el radio _____	32
N° 37:	MOE promedio por ubicación en el radio según altura _____	32
N° 38:	MOR promedio por ubicación en el radio según altura _____	32
N° 39:	Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura _____	33
N° 40:	Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura _____	33
N° 41:	Dureza radial por ubicación en el radio según altura _____	33
N° 42:	Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura _____	33
N° 43:	Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos _____	34
N° 44:	Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	35
N° 45:	Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	35