

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Pinus taeda* L. **DEL NORTE DE URUGUAY**



Informe N° 3

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

Junio 2004

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 Vulminot	Sociedad de Productores Forestales
Ing. Bernardo Ade	Sociedad de Productores Forestales
Ing. Agr. Pablo Iraola	Sociedad de Productores Forestales
Dr. Sabaki Ohta	LATU Sector Productos Forestales
Per. Agr. Hugo O' Neill	LATU Sector Productos Forestales
Tec. Agr. Felipe Tarigo	LATU Sector Productos Forestales
Ing. Quim. Raúl de Castro	LATU Sector Productos Forestales
Sr. Dilvar Silva	LATU Sector Productos Forestales
Sr. Francisco Gatto	LATU Sector Productos Forestales

Equipo de trabajo técnico
Per. Agr. Hugo O' Neill
Téc. Agr. Felipe Tarigo
Ing. Agr. Pablo Iraola

Agradecimientos

A FYMNSA y a Urufor S.A. por el apoyo recibido en la realización de este estudio.

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES	5
2.1 Muestreo y dases diamétricas de los árboles	5
2.2 Características de los rodales muestreados	6
2.2.1 Datos técnicos del rodal	6
2.2.2 Manejos (podas y rdeas)	7
3. ENSAYOS EN LAS TROZAS	7
3.1 Clasificación visual de las trozas	7
3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica	8
3.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	9
3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas (2" X 6")	10
4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6" 12	12
4.1 Secado de las tabas en horno industrial	12
4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual	12
4.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2" X 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	12
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"	13
4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Corriente de las tablas ensayadas	14
5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS	15
5.1 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)	15
5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica	16
5.3 Determinación de la dureza Janka	16
5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Corriente	17
6. RESULTADO Y DISCUSIÓN	17
6.1 Estudios realizados sobre trozas en estado verde	17
6.1.1 Clasificación visual	17
6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Básica	18
6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio	18
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	20
6.1.4.1 Análisis por altura según ubicación en el radio según altura	21
6.1.5 Módulo de Elasticidad de los árboles	21
6.2 Estudios realizados en tablas secas (2 X 6)	24
6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas (solo B y C)	24
6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas	26
6.2.3 Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas	27
6.2.4 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	28
6.2.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	28
6.2.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura	29
6.2.5.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	30
6.2.6 Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas	31
6.2.7 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS	32

6.2.8 Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural_____	33
6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos_____	35
6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas_____	35
6.3.2 Variación de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio_____	36
6.3.3 Variación de las propiedades mecánicas en la altura_____	37
6.3.4 Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en el radio_____	39
6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura_____	41
6.3.6 Relación entre las distintas propiedades en pequeñas probetas libres de defectos_____	42
6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de la tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos_____	43
7. BIBLIOGRAFÍA_____	45
Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de Pinus Taeda L. del Norte de Uruguay_____	46
Índice de Figuras, Cuadros y Gráficas_____	47

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de *Pinus taeda* Linnaeus, del departamento de Rivera, al norte 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-destrutivo. 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 taeda* Linnaeus, módulo de elasticidad, módulo de rotura, densidad, propiedades mecánicas.

SUMMARY

In this report mechanical properties of *Pinus taeda* Linnaeus, from north Uruguay, Rivera 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 taeda* Linnaeus, modulus of elasticity, modulus of 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 (GT 2 y GT 3), en el cual participan la Sociedad de Productores Forestales, la Asociación de Industriales de la Madera, la Dirección General 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 redizar 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 atribuimos gran importancia al conocimiento y a la caracterización de nuestras especies forestales para la obtención de madera de buena calidad. Esta tercera publicación pretende colaborar en el conocimiento de las características de la especie *Pinus taeda* L. implantada en el Uruguay, en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 123.500 hectáreas. En este caso analizaremos la madera de un rodal del norte de nuestro país, más precisamente del departamento de Rivera, donde se concentra más de un 40 % del área plantada.

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 elegido por especie, edad y manejo. Dicho muestreo (N° 8) se realizó en Mayo de 2002.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 25 árboles divididos en tres clases diamétricas (9, 8 y 8 por clase). La selección de los árboles se realizó por diámetro, poca conicidad, rectitud del fuste y hábito de ramas.

A cada árbol se le midió el DAP, 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 25) y la segunda el número de troza (1ra. basal, 2da. y 3ra. troza), ejemplo la troza 5-2 es la 2ª troza del árbol 5.

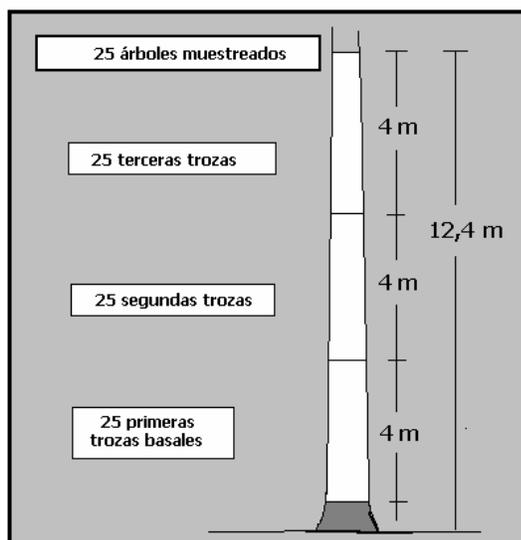


Figura N° 1: Muestreo y distribución de las trozas.

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

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

Clases diamétricas		Número de Individuos	DAP c/c Medio (cm)	Altura (m)		
Clase	Rango (cm)			Total	Ø = 15 cm	1º rama viva
1	33 - 40	9	39	23,3	18,0	10,1
2	41 - 49	8	45	23,4	18,2	9,4
3	> 50	8	54	24,5	19,7	10,6

2.2 Características de los rodales muestreados

2.2.1 Datos técnicos del rodal

Cuadro N° 2: Datos técnicos del rodal.

Especie	<i>Pinus taeda</i> L.
Localidad / Departamento	Tranqueras / Rivera
Año de Plantación	1979
Origen de la semilla	M.G.A.P. Departamento Forestal
Densidad de plantación (árboles / hectárea)	-----
Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.	7,1 - 7,2

2.2.2 Manejos (podas y raleos)

En el siguiente cuadro se presentan los manejos realizados al rodal muestreado:

Cuadro N° 3: Podas realizadas.

Podas			
Número	Edad (años)	Altura (m)	N° de árboles
1	7	3,0	Todos
2	9	5,0	Todos

En cuanto a los raleos, la información que poseemos es que estos montes han sido raleados a los 9, 12 y 15 años, con una densidad remanente de 250 árb/há. La información no está confirmada.

3. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 75 trozas verdes seleccionadas para el Grupo Técnico de Madera Aserrada, se realizaron en el Sector Productos Forestales del 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 reditud, diámetro y cantidad y disposición de los nudos.

Los distintos grados se muestran a continuación:

Cuadro N° 4: 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.

Una vez finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas, dejándolas de 3 m de longitud. Del metro restante se extrajo una rodaja de aproximadamente 5 cm de espesor para realizar las determinaciones de densidad básica 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 tomó una fotografía con una regla sobre la rodaja de forma de usar esta 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 próxima a la médula, "B" la ubicada en una zona intermedia y la "C" la próxima a la corteza (Ver figura N° 3).

La razón de tomar tres probetas bien definidas en el radio es la de permitir estudiar la variación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica de la médula a la corteza.

No está de más mencionar en este capítulo lo que significa madera juvenil, madera adulta y zona de transición entre ellas. La madera juvenil la podemos definir como la formada alrededor de la médula y que se distribuye en el radio hasta cierto anillo de crecimiento (esto varía dependiendo de la especie) y que se localiza a lo largo de todo el fuste. Madera adulta es aquella que se forma a partir de la zona de transición hacia el cambium y la corteza. Para determinar esta zona de transición se utilizan indicadores de la calidad de la madera como longitud de fibras o traqueidas, la densidad básica, etc. Debemos mencionar también que no es lo mismo duramen que madera juvenil, en la figura N° 4 vemos las distintas proporciones de madera juvenil, madera adulta, duramen y de albura en pinos de plantaciones.

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



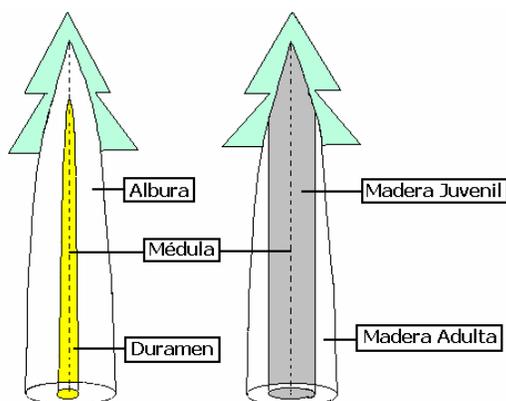


Figura N° 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie

Una vez fotografiada la rodaja se cortaron y pesaron las probetas (Peso verde). Luego 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 posteriormente fueron secadas en una estufa a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ hasta llegar a estado anhidro (Peso anhidro).

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:

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

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

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

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

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) mediante el ensayo no destructivo basado en el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, con 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. Las trozas en estado verde (3 m de longitud) fueron pesadas, medidas en la longitud, el diámetro mayor y el diámetro menor) para poder obtener el volumen y con el peso determinar la densidad.

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

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

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

E_{ft} :	Módulo de elasticidad por vibración longitudinal
L :	Longitud de la troza
f_l :	Frecuencia de vibración longitudinal
g :	Constante de aceleración gravitacional
n :	nº de nodo = 1
ρ :	Densidad de la madera (troza)

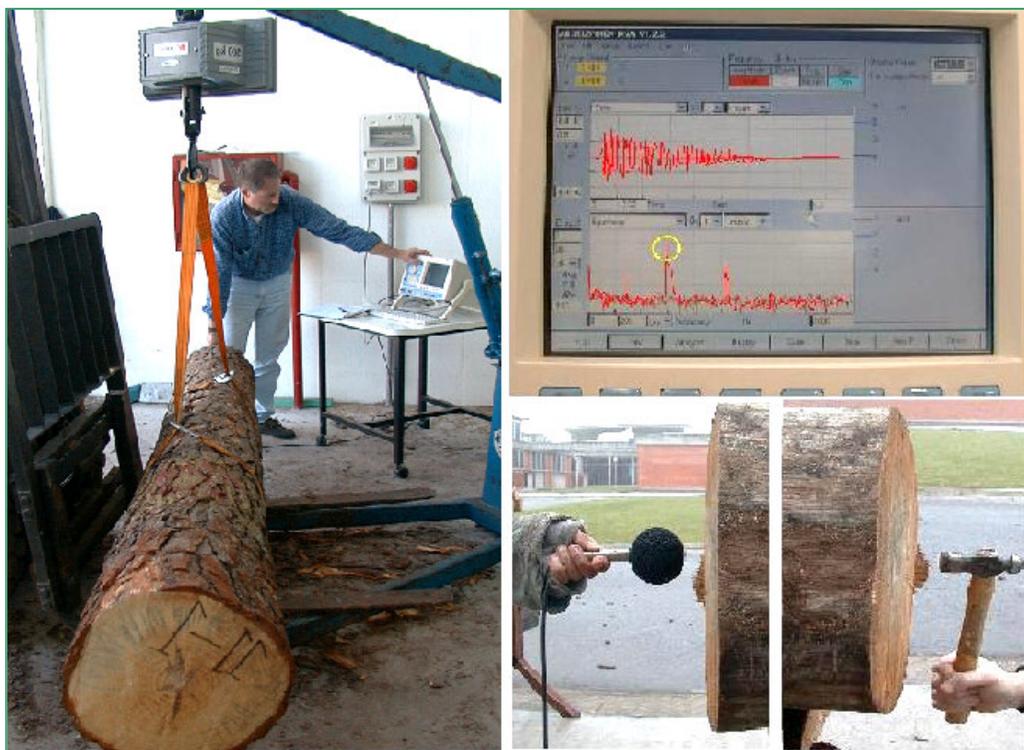
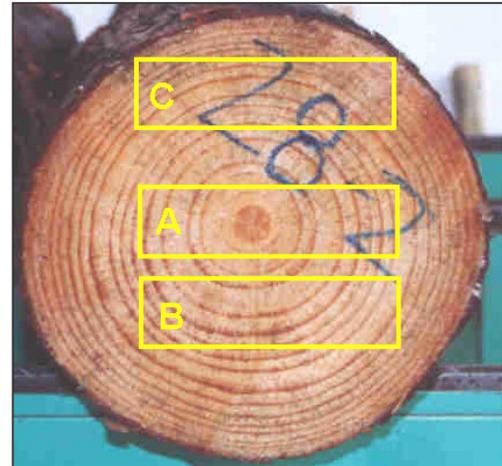
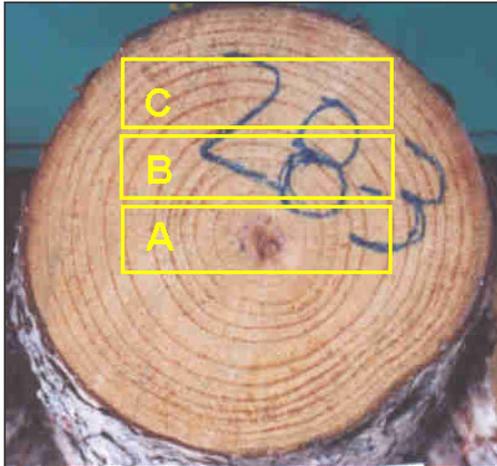


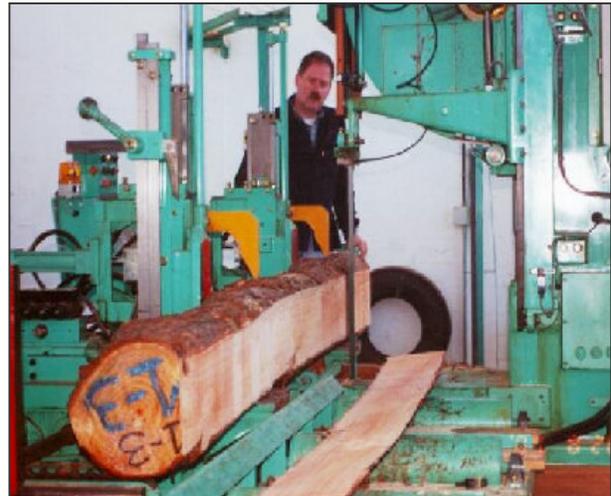
Figura N° 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer

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

Las trozas fueron aserradas en el Sector Productos Forestales del LATU, obteniendo de cada una de ellas tres tablas identificadas según su ubicación en el radio como: "A" la que incluían médula o parte de ella y por consiguiente madera juvenil, "B" tablas cercanas a la médula (intermedias) con diferentes porcentajes de madera adulta y juvenil y "C" tablas próximas a la corteza con una mayor proporción de madera adulta. Ver las siguientes figuras N° 6 y 7.



Figuras N° 6 y 7: Esquemas de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trozas.



Figuras N° 8 y 9: 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 con los ensayos sobre las tablas obtenidas:

Secado de las tablas en horno industrial
Dimensionado, escuadrado y cepillado (2"x 6") longitud 2,8 m
Inspección visual : Nudos (presencia, ubicación y tamaño), grietas y alabeos
Medición de anillos de crecimiento
Determinación del Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)
Determinación del Módulo de Elasticidad y de Rotura (Máquina Universal)
Determinación del Contenido de Humedad de las tablas ensayadas
Determinación de la Densidad Corriente de las tablas ensayadas

Figura N° 10: 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 tablas fue de 11,65 %. Luego del secado se 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 del secado fueron cepilladas y escuadradas, llevándolas a las dimensiones finales de ensayo de 50 mm x 150 mm x 2800 mm.

A estas tablas prontas para ser ensayadas se les realizó una inspección visual de defectos tales 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 del 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 determinó el volumen por medio de las dimensiones.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$E_{ft} = \frac{4 \cdot L^2 \cdot f^2 \cdot p}{g}$$

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



Figura N° 11: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer.

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° 12)

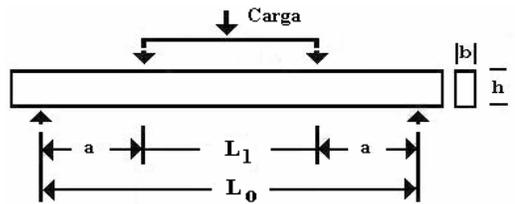


Figura N° 12. Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

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 mediante el mismo ensayo de flexión estática y calculados en forma automática por la Máquina Universal una vez finalizado el ensayo, utilizando las siguientes fórmulas:

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

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

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

ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.
L₀ : Distancia entre apoyos inferiores (span)
L₁ : Distancia entre apoyos superiores de carga
I : Momento de Inercia
Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

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

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 y el lugar 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 cuadradas de 40 mm x 50 mm 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 ± 2° 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/cm³)
V_{corriente} : Volumen a 11,65 % CH
P_{Anh} : Peso anhidro (g)
P_{corriente} : Peso corriente (g)
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 11.65% CH para las tablas.

5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS

A partir 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 respecto a las caras radiales (perpendiculares) y tangenciales (paralelas). Todas las probetas fueron acondicionadas en cámara climatizada en las condiciones de 20° C de temperatura y de 65 % de humedad relativa, para lograr una humedad de equilibrio en las mismas del orden del 12 %.

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

- Flexión Estática, determinación del Módulo de Elasticidad
- Flexión Estática, determinación del Módulo de Rotura
- Flexión Dinámica, determinación de la Resistencia al Impacto
- Dureza Janka

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

El ensayo de flexión estática se realizó sobre probetas de 25 mm x 25 mm x 400 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° 13)

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

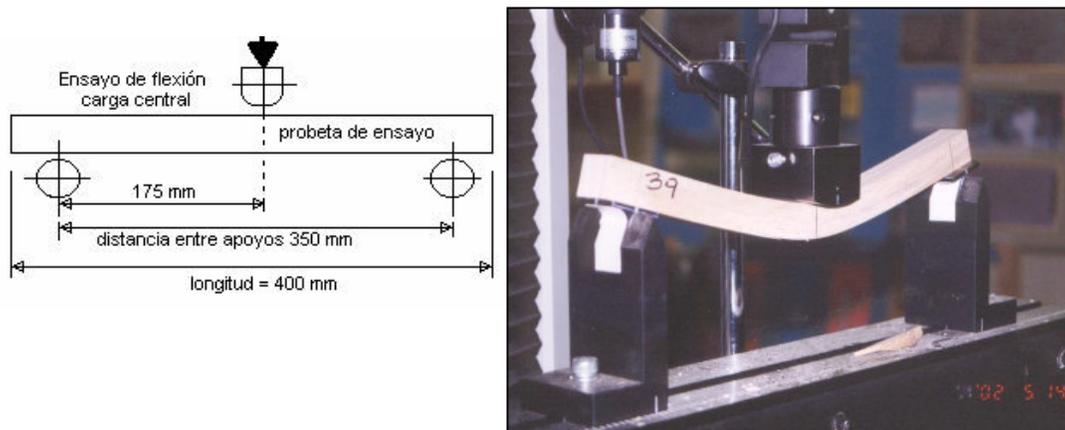


Figura N° 13: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

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 20 mm x 20 mm x 300 mm en péndulo Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se produjo en el centro de la probeta, con orientación sobre la cara radial.

La norma utilizada fue la JIS (Japanese Industrial Standard) Z 2116 "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)

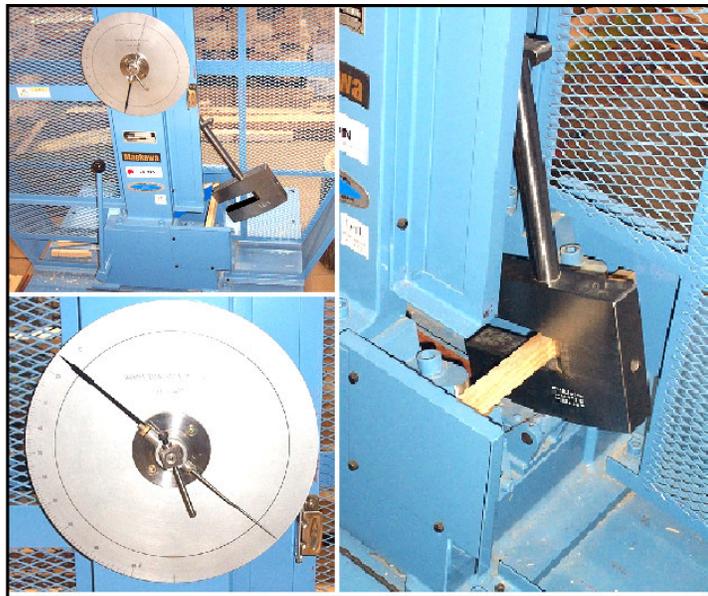


Figura N° 14: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)

5.3 Determinación de la Dureza JANKA

El ensayo de resistencia a la dureza se realizó sobre probetas de 45 mm x 45 mm x 150 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 (Ø = 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° 15)

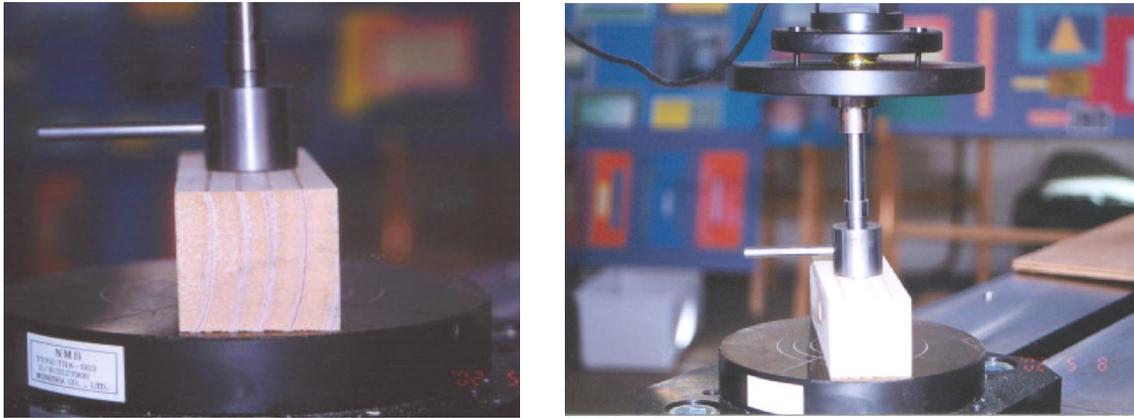


Figura N° 15: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.

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 cuatro categorías o grados. De cada árbol se obtuvieron 3 trozas de 4 metros cada una. En el Cuadro N° 5 se muestra, para cada tipo de troza la proporción de las mismas que pertenecen a cada categoría. El criterio de clasificación está explicado en el capítulo 3.1.

Cuadro N° 5: Porcentaje de trozas según la categoría a la que pertenecen

	CATEGORÍA			
	I	II	III	IV
Troza 1	96	4	0	0
Troza 2	36	60	4	0
Troza 3	0	12	64	24

Recordemos que los árboles fueron podados a 5.0 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 básicas 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 y IV.

6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Básica

El contenido de humedad promedio de las trazas fue de 138%, encontrándose variaciones importantes entre individuos y también para una misma ubicación en radio y altura.

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 variabilidad entre individuos.

El contenido de humedad y su variabilidad son características importantes a 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, en el radio y en la altura del fuste.

Cuadro N° 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Básica

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Básica (g/cm ³)
Número de probetas	225	225
Promedio	138	0,391
Máximo	202	0,587
Mínimo	68	0,307
Desv. Est.	25	0,049
C.V. %	18	12

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 es mayor desde una ubicación próxima a la médula (probetas "A") disminuyendo hasta la zona central (probetas "B") y continuando el descenso hasta la zona más cercana a la corteza (probetas "C"). Ver Cuadro N° 7.

La densidad básica se comporta de forma opuesta, aumentando linealmente desde la médula hasta la corteza. Estos comportamientos se pueden ver con claridad en el gráfico N° 1.

Cuadro N° 7: 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	75	152	22	14	0,351	0,025	7,1
B	75	143	17	12	0,389	0,027	6,9
C	75	118	24	20	0,434	0,049	11

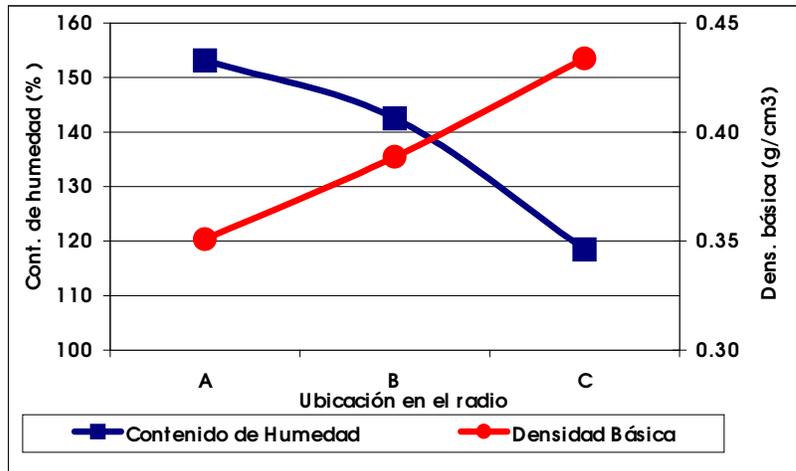


Gráfico N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación radial

En este punto vemos un comportamiento distinto al Pino taeda de el Litord, ya que al no presentar tanta resina las probetas A se muestra un comportamiento mas normal, creiendo la densidad y bajando la humedad a medida que nos alejamos de la médula.

La densidad aumenta con la edad cambial (del cambium). Esto se pudo ver cuando se analizó la densidad en función del anillo respectivo de cada probeta.

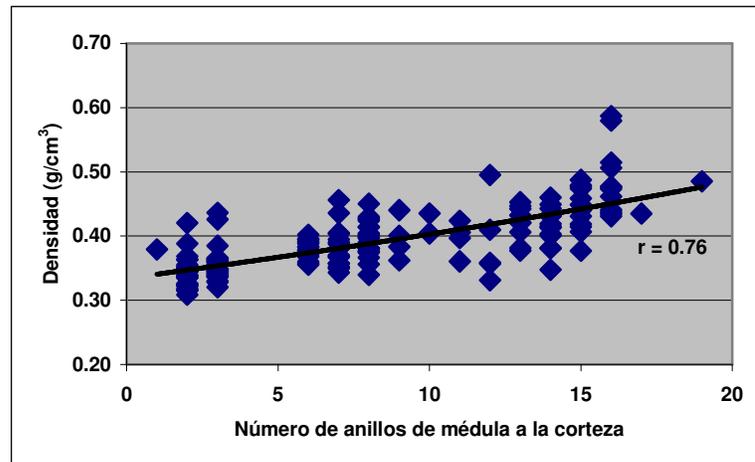


Gráfico N° 2: Densidad Básica según anillo medio de la probeta

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 diferencia entre altura están dadas básicamente por la distinta proporción de altura y por la distinta relación madera juvenil / madera adulta, que encontramos en las distintas alturas.

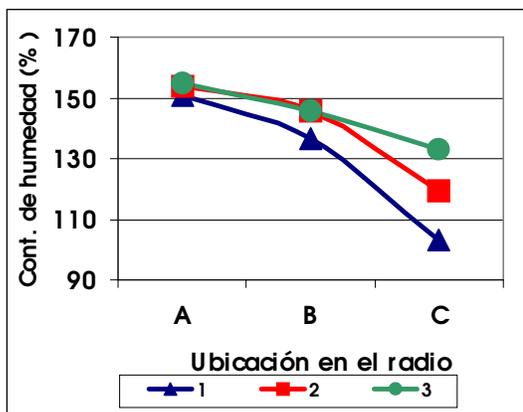


Gráfico N° 3: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio

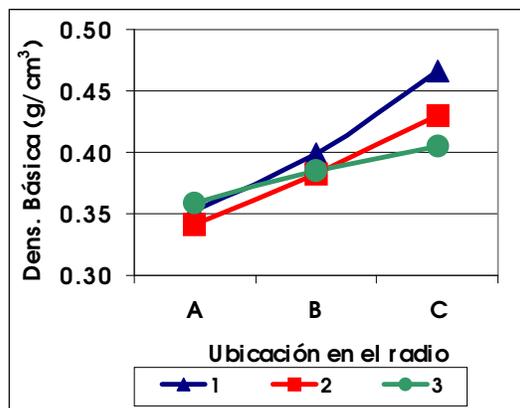


Gráfico N° 4: Densidad Básica por altura según ubicación en el radio

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 la madera juvenil en cada zona.

Cuadro N° 8: 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	75	130	28	21	0,406	0,060	15
2	75	140	26	18	0,385	0,047	12
3	75	145	21	14	0,383	0,033	9

En la primera troza hay una menor proporción de madera juvenil que en el resto de las trozas esto hace 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.

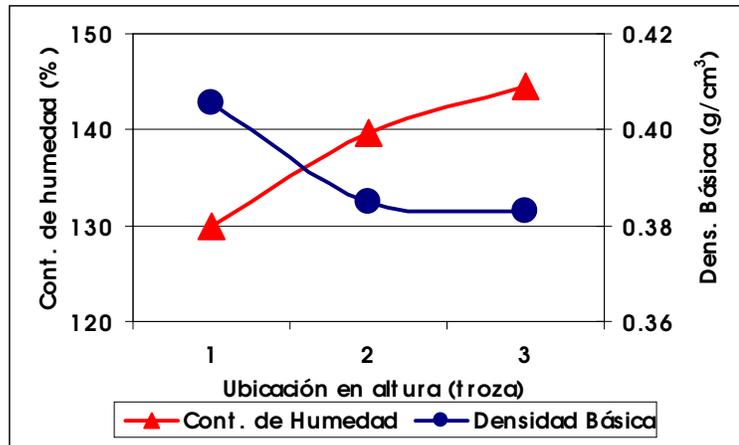


Gráfico N° 5: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura

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.

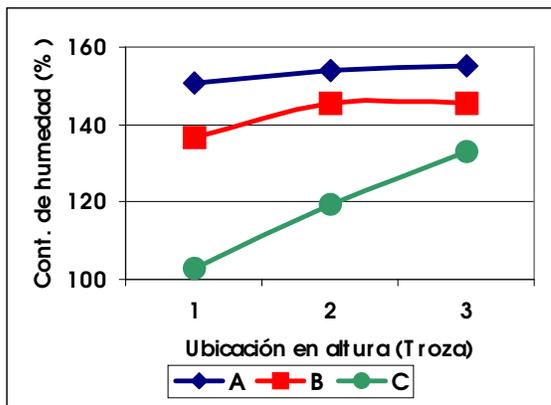


Gráfico N° 6: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura

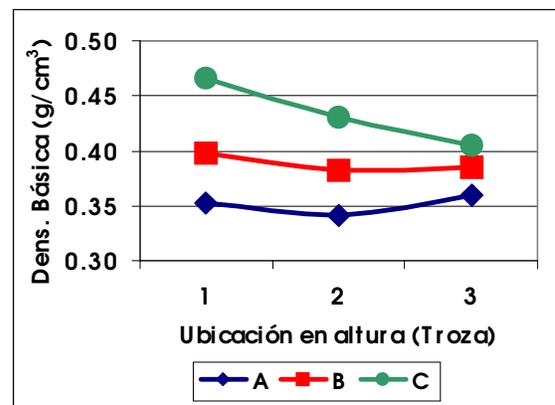


Gráfico N° 7: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura

6.1.5. Módulo de Elasticidad de los árboles

El MOE promedio de las trozas analizadas (25 de cada altura) es de 7192 MPa, existiendo una variación importante de los valores individuales de las trozas.

Como vemos en el gráfico N° 8 hay una mayor uniformidad en los valores de MOE entre árboles, tomando como valor del árbol el promedio de los valores de las tres trozas (primera, segunda y tercer troza).

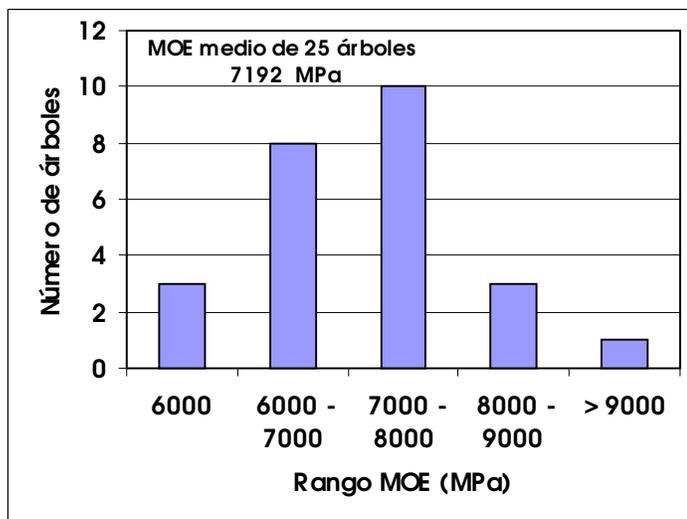


Gráfico N° 8: Variación de los valores de MOE entre árboles

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, para la troza basal, a la influencia de la madera producida en los primeros años y a la presencia de madera anormal en la base del árbol (primeros 70 cm según bibliografía), y en el caso de la tercer troza, a la mayor proporción de madera juvenil.

Cuadro N° 9: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza

Árbol N°	MOE Trozas con corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
Media	6335	7825	7415	7192
Máximo.	9189	10286	9781	9752
Mínimo.	4066	6275	5437	5778
Desv. estd.	1192	968	960	1040
C.V. (%)	19	12	13	15

Además de que la segunda troza presenta el valor de MOE más alto, es la que tiene un 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. Presunción que confirmaremos más adelante.

En el siguiente gráfico N° 9, se muestra el MOE de las trozas con corteza en las tres distancias. En estudios anteriores (Propiedades Mecánicas de *Pinus Elliottii* Eng. del Litoral del Uruguay, Grupo Técnico de Madera Aserrada, Informe N° 1, Octubre 2002) y (Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral del Uruguay, Grupo Técnico de Madera Aserrada, Informe N° 2, Junio 2003) observamos que existía alta correlación entre el MOE obtenido de las trozas con corteza y sin corteza ($r = 0,989$ para *Pinus elliottii* y $r = 0,937$ para *Pinus taeda*) también se constató una diferencia entre ambos valores de MOE de aproximadamente un 10%. Estos valores altos de correlación entre las dos determinaciones es un hecho positivo ya que no sería necesario descortezar las trozas para estimar el MOE, tanto en el trabajo de investigación y caracterización como en el proceso industrial para la clasificación de trozas.

Más adelante veremos que la relación entre el MOE de las trozas y el de las tablas obtenidas de estas es alta, hecho que nos permite validar este método no destructivo para determinar el MOE.

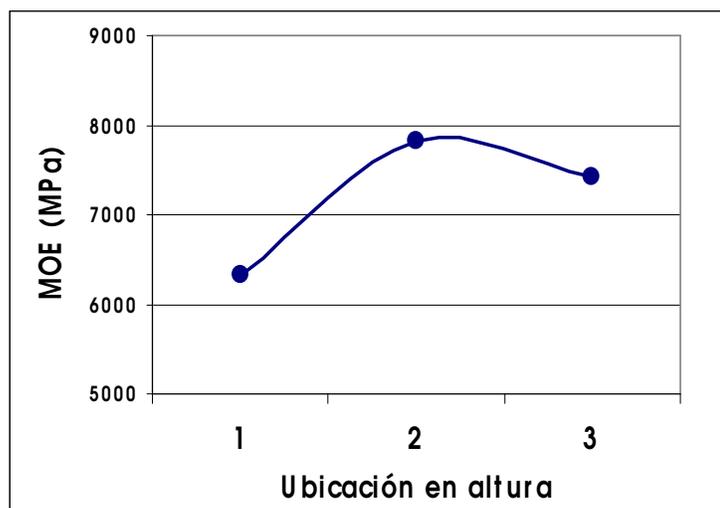


Gráfico N° 9: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza según la posición en altura

Se encontró una correlación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento expresada como diámetro a altura de pecho (DAP), $r = -0,603$ ver gráfico N° 10.

En los estudios realizados en *Pinus elliottii* y en *Pinus taeda* de Río Negro (informes Nros. 1 y 2 de Grupo técnico de Madera Aserrada GT3) se observó que no existe una relación significativa entre el MOE y el DAP ($r = -0,382$ *Pinus elliottii* y $r = -0,373$ para *Pinus taeda*).

Una explicación de este nuevo resultado podría explicarse por una mayor velocidad de crecimiento. Si analizamos las trozas de menor diámetro, obtenemos una mala relación, ($r = -0,275$), por lo que podemos concluir que la mayor velocidad de crecimiento nos da una buena correlación entre el DAP y el MOE de las trozas calculado con el FFT Analyzer. (Ver gráfico N° 11).

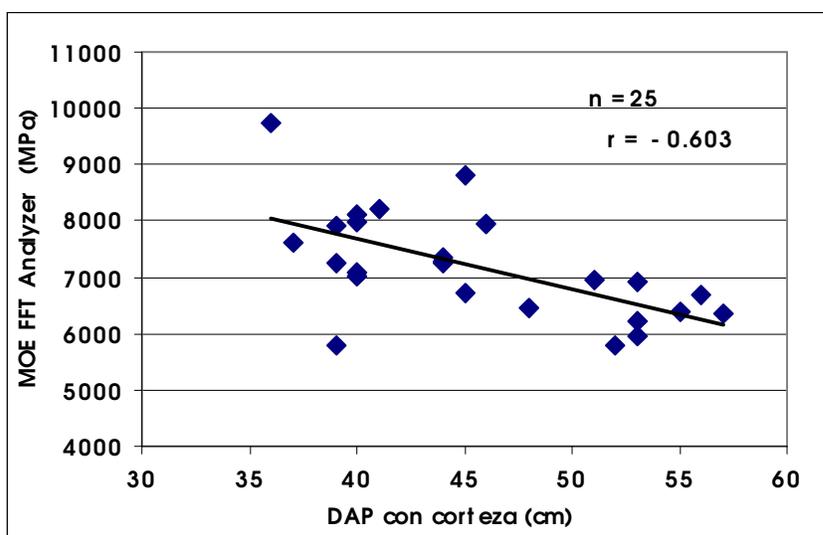


Gráfico N° 10: Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE promedio (MPa).

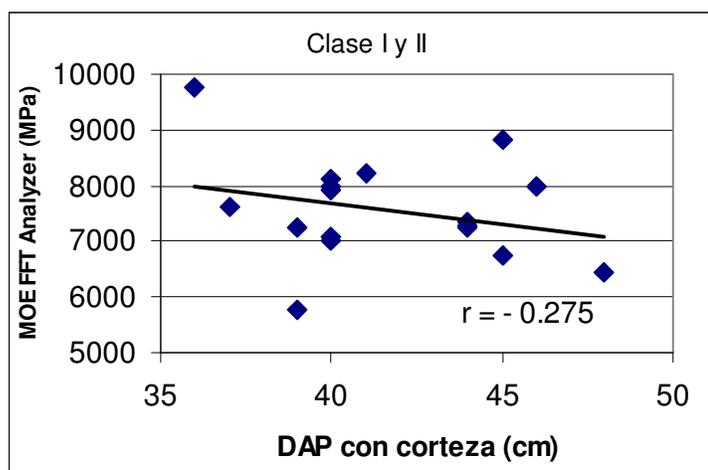


Gráfico N° 11: Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE para trozas de menor diámetro.

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

Los estudios realizados en tablas secas dimensionadas (50mm x 150mm x 2.8 m) los dividimos en dos tipos, ensayos mecánicos no destructivos y ensayos mecánicos destructivos. Como ensayo no destructivo se realizó la determinación del MOE por el método de la principal frecuencia de vibración mediante el equipo FFT Analyzer. El ensayo destructivo fue el de flexión estática, que se realizó en la máquina universal y se determinaron el MOE y el MOR.

Las tablas fueron secadas en horno industrial y posteriormente fueron llevadas a sus dimensiones finales de ensayo. El contenido de humedad promedio de las tablas luego del secado y en condiciones de ensayo fue de 11.65 %.

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

En el cuadro N° 10 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 deberían ser descartadas para usos estructurales, como mostraremos en los capítulos siguientes.

Cuadro N° 10: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C)

	MOE FFT Analyzer (Mpa)	MOE Maquina Universal (Mpa)	MOR Maquina Universal (Mpa)	Densidad Corriente (g/cm ³)
Número	151	151	151	150
Promedio	8725	7893	37	0,425
Máximo	16569	14546	90	0,576
Mínimo	5005	3433	8,4	0,332
Desv.std	2015	1838	20	0,047
C. V. %	23	23	54	11

En el cuadro anterior (Cuadro N° 10) se puede ver que los valores mínimos tanto para el MOE como para el MOR son bajos. Esto es debido principalmente a las tablas provenientes de la tercera traza, en las que la proporción de madera juvenil es mayor (menor edad cambial), también tiene incidencia en el caso del MOR la presencia de nudos de gran tamaño y/o la agrupación de nudos. Recordemos que el rodal fue podado hasta 5,0 m de altura (mitad aproximada de la segunda traza).

Debemos tener en cuenta también que la tercera traza tiene un diámetro menor, hecho que dificultó obtener las tres tablas netamente definidas en su clasificación A-B-C. Muchas veces las tablas "B" tenían parte de médula o en otros casos cantos muertos. Recordamos la influencia de la mayor o menor presencia de madera juvenil en los valores de resistencia.

Las ramas basales normalmente son más robustas que las superiores produciendo nudos grandes y fibras inclinadas en zonas periféricas a los nudos, ramas muertas produciendo nudos sueltos y en ciertos casos podridos, todo esto afecta significativamente los valores de MOR de las tablas.

En la práctica, solo 13 de las 76 tablas analizadas de la tercer traza califican como madera estructural según la norma JAS (categoría E 90), superando un MOE de 7850 (MPa). De ellas 2 tablas son "A", 2 tablas son "B" y 9 tablas son "C".

Si descartamos las terceras trazas para el uso estructural en base a lo fundamentado anteriormente, los promedios y otros parámetros estadísticos obtenidos son los que se muestran en el siguiente cuadro N° 11.

Cuadro N° 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" de la 1° y 2° traza

	MOE	MOE	MOR	Densidad
	FFT Analyzer	Maquina Universal	Maquina Universal	Corriente
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(g/cm ³)
Número	101	101	101	101
Promedio	8973	8248	43	0.433
Máximo	16569	14546	90	0.576
Mínimo	5005	4871	12	0.332
Desv.std	2295	1985	21	0.050
C. V. %	26	24,1	47,4	12

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 diciendo que 6 tablas "A" de la primera traza, 3 tablas "A" de la segunda traza y 7 tablas "A" de la tercera traza, solo 16 tablas de 73 tablas "A" podrían ser utilizadas como madera estructural. Mas adelante veremos con mayor detalle como se distribuyen los valores de las tablas dentro de las categorías estructurales (según norma JAS).

Observamos que tanto en el cuadro N° 10 como en el N° 11 que los valores mínimos de MOR son muy bajos 8,4 y 12 MPa respectivamente. Fueron incluidos en este estudio debido a que son valores obtenidos y que muestran la gran variabilidad que existe en la madera. En un proceso industrial normalmente se realiza una inspección visual para clasificación de madera estructural, estas tablas con valores tan bajos no calificarían y serían descartadas para el uso estructural. Estudiamos por que razón estas tablas presentan valores menores a 15 MPa y observamos que el tipo de rotura (la forma y ubicación en la tabla, ver figura N° 16) no era normal, esto se debió principalmente al agrupamiento de nudos medianos o pequeños o a la presencia de nudos de gran tamaño en la zona media de la tabla y que ocuparon gran parte del ancho de la misma.



Figura N° 16: Tipo de la rotura por tensión y por corte en área nudosa

En la figura N° 16, podemos observar tres ejemplos de tablas que tuvieron un valor de MOE inferior a los 15 Mpa en las que influye notoriamente la zona nudosa central. Dichas tablas hubieran sido descartadas en una clasificación visual previa para uso estructural.

6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas

Se realizó la comparación entre los valores de Módulo de Elasticidad obtenidos mediante ensayos no destructivos (FFT Analyzer) y destructivos en ensayo de flexión estática (Máquina Universal). Se observó una muy buena correlación entre ambos, ($r = 0.949$) validando el uso del FFT Analyzer como herramienta para la estimación del MOE. Esto se puede observar en el gráfico N° 12.

En trabajos anteriores observamos también la buena correlación que existe entre los resultados de MOE obtenidos por medio del equipo FFT Analyzer y los resultados obtenidos con otros equipos similares no destructivos como el Pundit, el Fakopp, Sylvatest, etc. Observamos que los valores de MOE obtenidos mediante el FFT Analyzer son ligeramente superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal.

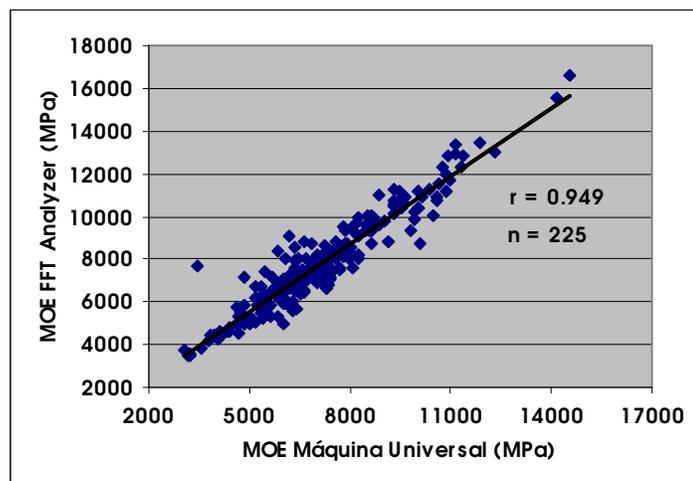


Gráfico N° 12: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)

En las tablas no se encontró una alta correlación entre el MOE y el MOR, esto se debe a que el MOR esta 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 cambid. Podemos ver en el gráfico N° 13, a modo de ejemplo que para un valor de MOE de 6000 (MPa) existe una variación de valores de MOR de 10 a 60 (MPa).

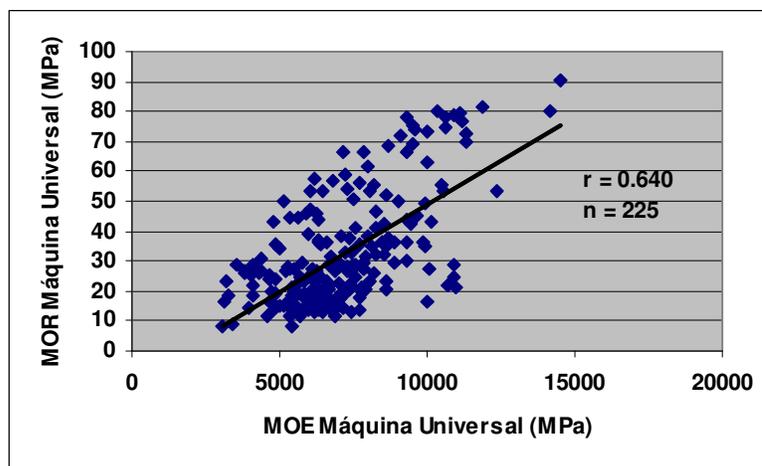


Gráfico N° 13: Relación entre el MOR y el MOE

6.2.3 Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas

Se buscó analizar la relación de las propiedades mecánicas (MOE y MOR) con la densidad corriente, no encontrando una correlación significativa en el caso de las tablas "A" ($r = 0,12$), tampoco en las tablas "B" ($r = 0,17$) y si una mejor correlación en las tablas "C" ($r = 0,61$) como muestra el gráfico N° 14. 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 todas las probetas agrupadas.

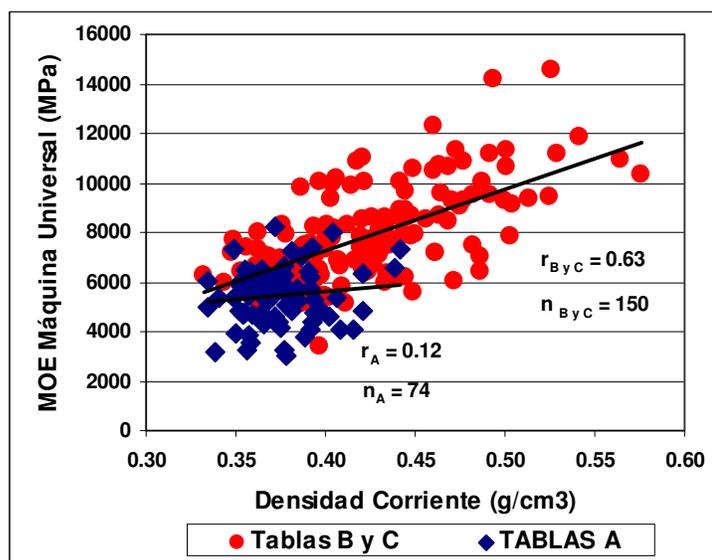


Gráfico N° 14 Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elástico (Máquina Universal)

6.2.4 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 dejan de la médula y se acercan a la corteza. Es decir, la madera juvenil tiene valores menores para todas las propiedades mecánicas que la madera adulta y estos valores varían según las distintas proporciones de ellas que existen en el radio.

Las tablas "C" son las únicas que presentaron los mayores valores para las propiedades mecánicas y las tablas "A" (madera juvenil), y las tablas "B" (madera de transición) fueron las que presentaron los valores menores confirmando que no son adecuadas para uso estructural, o sea que no superan el límite de 7850 (MPa).

Cuadro N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio

Ubicación de la tabla	Número de tablas	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máquina Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm ³)
A	74	5790	5434	22	0,374
B	76	7510	6949	31	0,398
C	75	9957	8849	43	0,452

En el gráfico N° 15, podemos observar claramente la tendencia de los valores tanto de MOE como de MOR, que aumentan linealmente a medida que nos acercamos a la corteza.

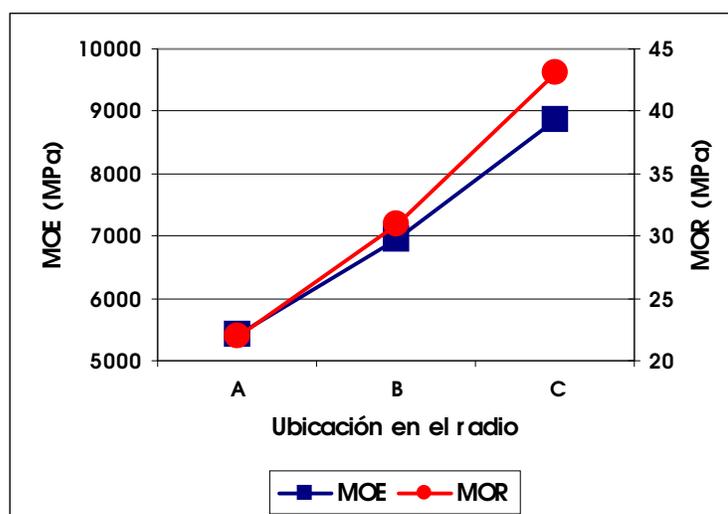


Gráfico N° 15: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio

6.2.4.1. 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. Para cualquier altura las tablas "C" son superiores, o dicho en otras palabras cuanto más edad cambial tiene la madera, mayores son sus propiedades mecánicas.

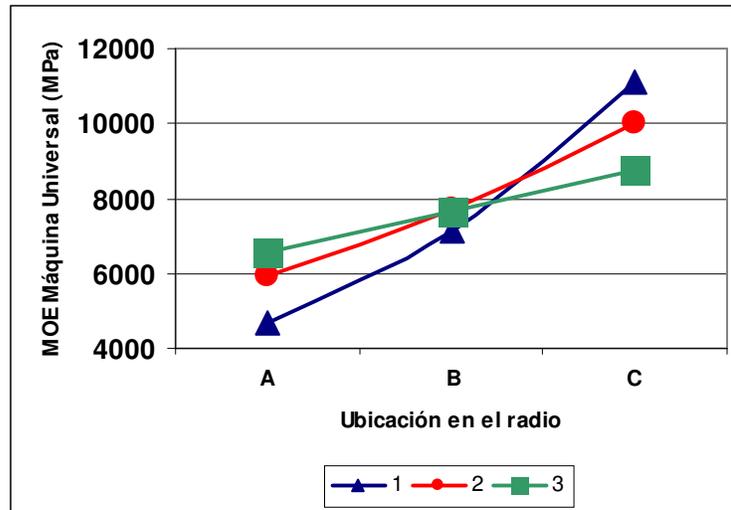


Gráfico No 16: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura.

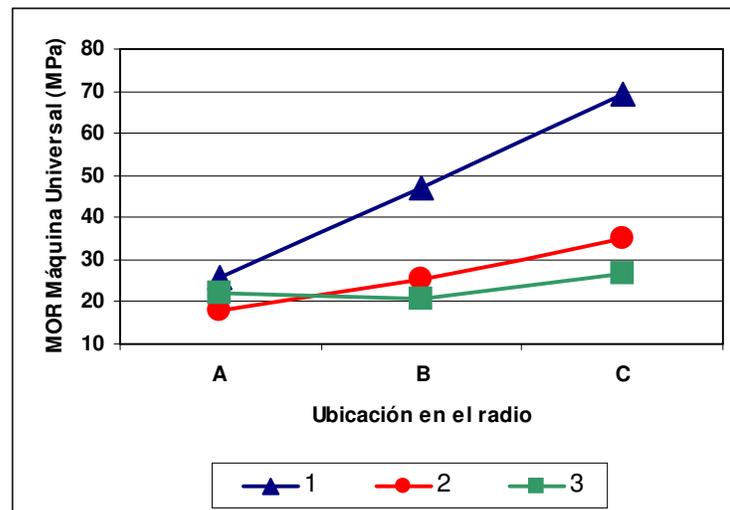


Gráfico No 17: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura.

Los valores del MOE (gráfico N° 16) el comportamiento es bastante diferente para las tablas "A" y "B" en las tres alturas, las tablas "C" tienen un comportamiento similar al del MOR y la tendencia general es que aumenten los valores a medida que nos alejamos de la médula.

En el caso del MOR (gráfico N° 17) para las tablas "A" son bastante constantes con la altura mientras que en las tablas "B" y "C", estos valores de las tablas de la traza basal superaron a las de las segundas trazas 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 traza basal las tablas "C" tenían en promedio madera de 16 años, en la segunda traza de 13 años y en la tercera de 11.

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

Los valores promedio de MOE son superiores en la segunda traza, para el MOR los valores promedio son más altos en la traza basal, siendo menor en la segunda traza y menor aún en la tercera.

Cuadro N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en altura

ALTURA	Número de Tablas	MOE FFT ANALYZER (MPa)	MOE (MPa) Máquina Universal	MOR (MPa) Máquina Universal	Densidad Corriente (g/cm ³)
1	71	7684	7156	48	0.431
2	77	7940	7333	26	0.398
3	76	7660	6770	23	0.398

Se puede ver en el cuadro N° 13 y en el gráfico N° 18 que la altura afecta en menor medida a los valores de MOE que a los valores de MOR. En cuanto al MOR vemos que su comportamiento es debido principalmente a la incidencia que tiene en esta propiedad la presencia de nudos (poca 5,0 m).

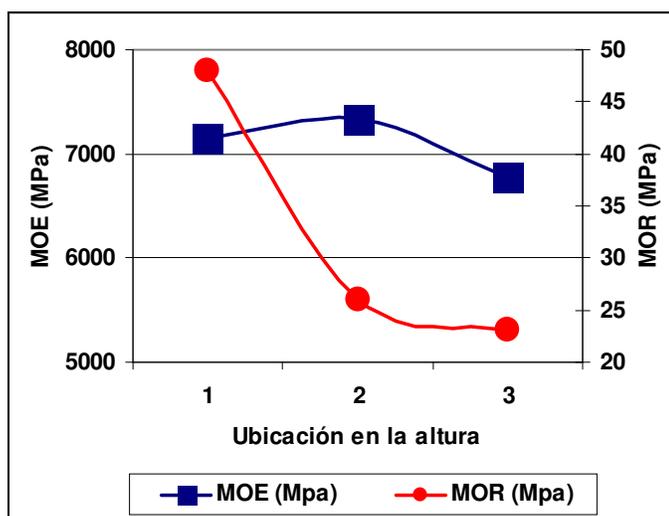


Gráfico N° 18: Estudio de MOE y MOR (Máquina Universal) según ubicación en altura

6.2.5.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación en altura para cada una de las ubicaciones en el radio, observamos un comportamiento similar al promedio. La tendencia general es que las propiedades mecánicas disminuyen a medida que aumenta la altura. Este comportamiento no es tan claro en el caso del MOE en las probetas "A" en las que los valores aumentan en la altura y en las "B" aumentan en la altura pero tienen el máximo valor en la segunda traza (Gráfico N° 19).

En el caso del MOR los valores disminuyen a medida que avanzamos en la altura, manteniendo las probetas "A" los valores más bajos seguidas de las "B" y luego las "C" con los valores más altos. Podemos ver que en la tercer traza los valores promedio de MOR para los tres tipos de probetas son muy similares (Gráfico N° 20).

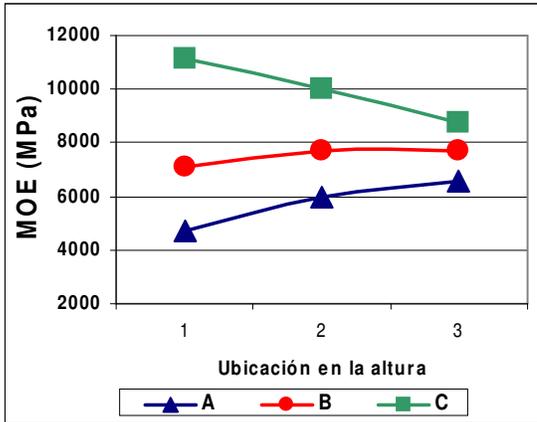


Gráfico N° 19: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

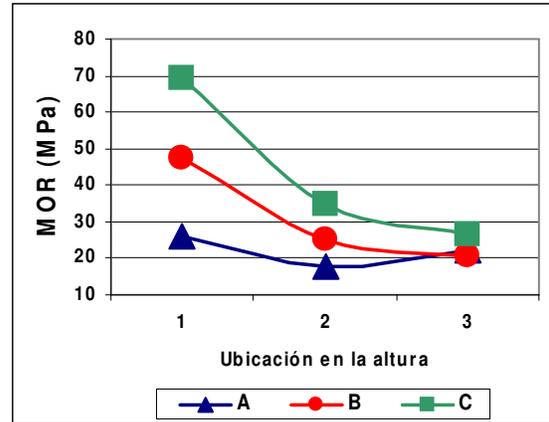


Gráfico N° 20: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

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

Se estudió la relación entre el Módulo de Elasticidad de las trozas verdes obtenido mediante el ensayo no destructivo (FFT Analyzer) y el obtenido en ensayo de flexión estática (Máquina Universal) del promedio de las tablas aserradas de cada una de las trozas.

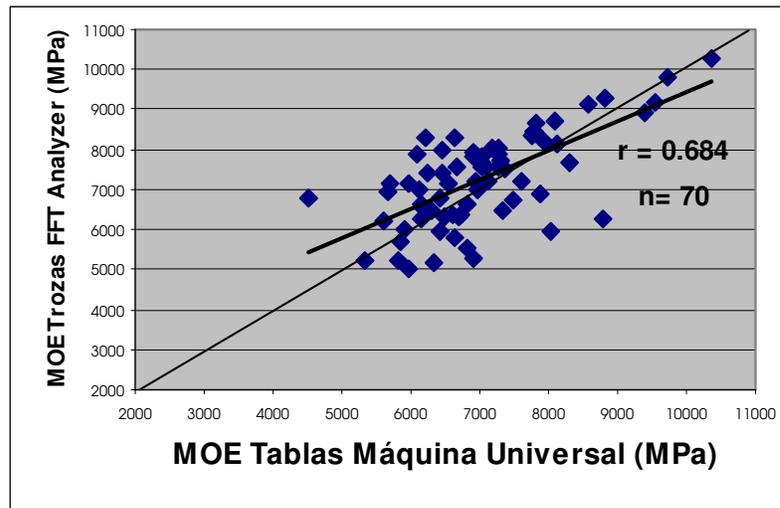


Gráfico N° 21: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas

Al igual que el *Pinus taeda* de el Litoral estudiado y los resultados publicados en "Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* del Litoral del Uruguay, (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino "GT3", Informe N° 2, Junio 2003) sí se observó una relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas de estas trozas ($r = 0,684$), recordemos que para *Pinus taeda* del Litoral fue ($r = 0,664$).

Analizando esta relación por la ubicación en la altura de la troza, encontramos que para las primeras trozas el coeficiente de correlación fue ($r = 0,711$), para las segundas trozas fue ($r = 0,845$) y para las terceras trozas fue ($r = 0,638$). Vemos que la correlación es buena en las tres alturas.

La importancia de que exista una buena correlación radica en que el FFT Analyzer puede ser apto en la estimación del MOE y de esta forma permitir una adecuada clasificación por resistencia mecánica en el patio de trazas, en el monte, etc.

6.2.7 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS

En los siguientes cuadros N° 14 y N° 15 se muestra la clasificación de las tablas según la norma JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Según dichas normas a partir de las categorías E90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa), la madera puede ser utilizada con fines estructurales en la construcción.

Para el caso del *Pinus taeda* en estudio, el 29% de las tablas se encontraron en la categoría E90 o mayor. Podemos ver que en la categoría anterior (E 70 de 5880 a 7850 MPa) se concentra un 44 % de del total de las tablas, que no calificarían para uso estructural. Con respecto a esto decimos que disminuyendo la distancia entre apoyos (ejemplo: viga) y o aumentando la sección podríamos utilizar parte de estas tablas para dichos usos.

Es importante decir que la evaluación de las tablas se realizó en base a los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de Flexión Estática en máquina universal. Hemos visto en este trabajo y en otros realizados en pinos que existe una diferencia entre el MOE obtenido mediante el FFT Analyzer (superior entre 8 y 10 %) y el MOE obtenido mediante el ensayo en máquina universal. De lo anterior concluimos que para realizar la misma clasificación o evaluación en base a el MOE obtenido mediante FFT Analyzer debemos tener en cuenta esta diferencia.

Cuadro N° 14: Porcentaje de tablas según categoría JAS

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE Máquina Universal (MPa)	Promedio Tablas	
			Cantidad (225)	Proporción (%)
< E 50			8	4
E 50	40-60	3920-5880	53	24
E 70	60-80	5880-7850	99	44
E 90	80-100	7850-9810	39	17
E 110	100-120	9810-11770	22	10
E 130	120-140	11770-13730	2	1
> E 150			2	1

En el gráfico N° 22 representamos la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que en los rangos E 70 y E 90 se concentra un 61 % de las tablas ensayadas.

En el gráfico N° 23 vemos esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla (A-B-C), donde la mayoría de las tablas que pueden utilizarse como madera estructural son tablas "C" y "B", donde el 69 % de las tablas "C" son aptas para uso estructural, el 16 % de las tablas "B" y solo el 3 % de las tablas "A" (ver cuadro N° 16).

Cuadro N° 15: Porcentaje 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	Porcentaje	Cant	Porcentaje	Cant	Porcentaje
< E 50			7	9	0	0	1	1
E 50	40-60	3920-5880	40	54	12	16	1	1
E 70	60-80	5880-7850	25	34	52	68	22	29
E 90	80-100	7850-9810	2	3	7	9	30	40
E 110	100-120	9810-11770	0	0	5	7	17	23
E 130	120-140	11770-13730	0	0	0	0	2	3
> E 150			0	0	0	0	2	3

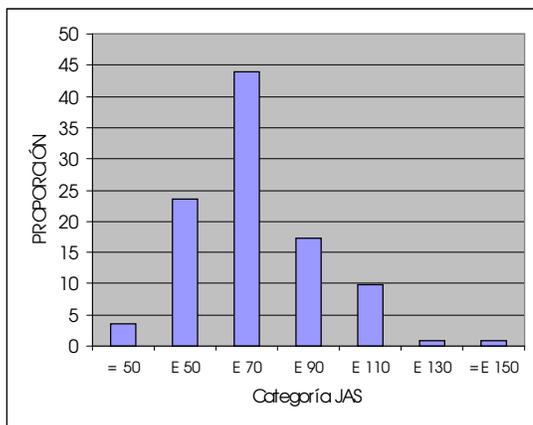


Gráfico N° 22: Proporción de tablas ensayadas según categoría JAS

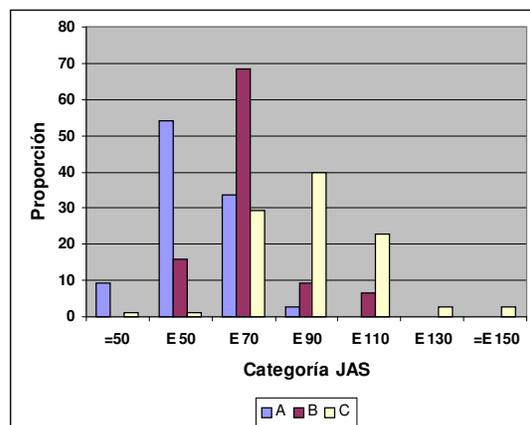


Gráfico N° 23: Proporción de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS

Analizamos el porcentaje de tablas A-B-C que según la norma JAS calificarían como madera para uso estructural, discriminándolas también por la altura del fuste (primer, segunda y tercer trazo). Recordemos que a partir de la categoría E90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa) la madera sería apta para uso estructural (Ver cuadro N° 16).

Cuadro N° 16: Número de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS

	TABLAS									TOTAL
	A			B			C			
Troza	n	• E 90	%	n	• E 90	%	n	• E 90	%	
1	23	0	0	24	5	21	24	22	92	71
2	24	0	0	27	5	18	26	20	77	77
3	26	2	8	25	2	8	25	9	36	76
TOTAL	73	2	3	76	12	16	75	51	68	

De acuerdo al cuadro anterior podemos observar que para las 73 tablas "A", solamente 2 de ellas califican para uso estructural, un 3%, para las 76 tablas "B", 12 califican para uso estructural, 16% y de las 75 tablas "C", 51 califican para uso estructural, o sea un 68% de ellas. Es interesante destacar los altos porcentajes que se obtienen de las tablas "C" de las primeras y segundas trozas.

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

En la actualidad la tendencia mundial para la clasificación mecánica de la madera (Mechanical Stress Rated Lumber) para uso estructural está orientada hacia la evaluación mecánica por métodos no destructivos en lugar de los métodos de clasificación visual.

En este trabajo sobre madera proveniente de plantaciones de *Pinus taeda*, analizaremos los resultados de los ensayos mecánicos destructivos (según normas JAS) y no destructivos (FFT Analyzer), para este análisis debemos tener en cuenta lo que hemos constatado en otros estudios anteriores que nos muestran una inferioridad de los valores promedio obtenidos por ensayo de flexión estática en máquina universal (ensayo destructivo) entre un 10 y un 15% frente a los obtenidos por métodos no destructivos. Tomando en cuenta esto último podremos hacer uso de estos métodos no destructivos para la estimación del MOE, y por lo tanto de las características de esta madera.

En los siguientes gráficos Nros. 24 y 25, utilizaremos los dos métodos para clasificar la madera para uso estructural y no consideraremos la influencia en el comportamiento superior de los valores del

método no destructivo, pero nos permiten conocer y caracterizar las maderas nacionales para uso estructural.

Se agrupan a las tablas "A" en el gráfico N° 24 y a las tablas "B" y "C" en el gráfico N° 25. En el primero se puede ver que las tablas "A" tienen valores de MOE bajos y agrupadas, entrando muy poca proporción de estas en la categoría estructural según JAS, mientras que en el gráfico N° 25 se puede ver que tanto las tablas "B" como las "C" tienen una alta dispersión de sus valores, las tablas "C" tienen valores de MOE más altos y varias tablas "B" y "C" entran en la categoría estructural

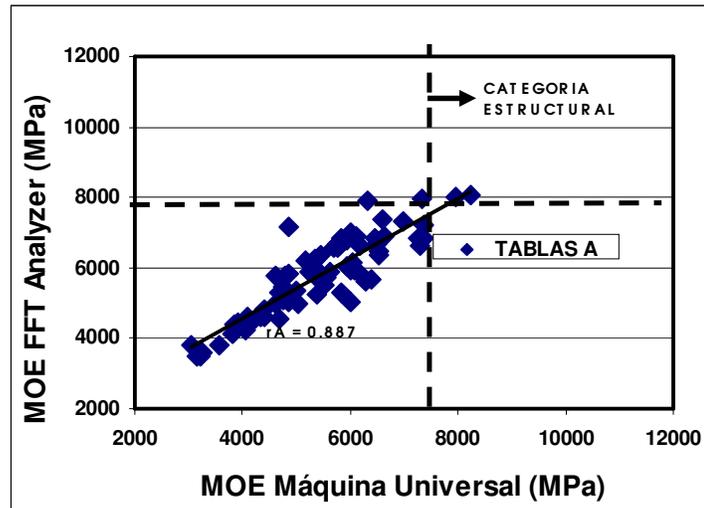


Gráfico N° 24 : Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A" .

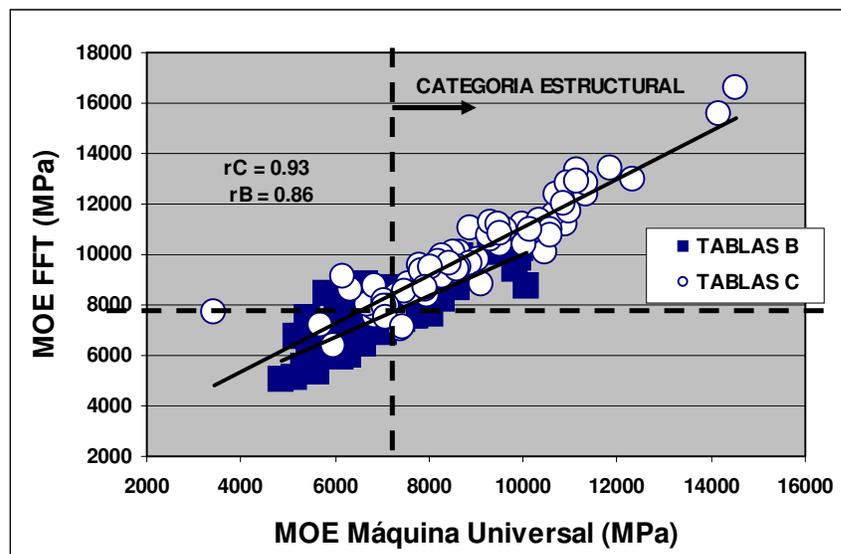


Gráfico N° 25 : Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "B y C".

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 conducir 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.

6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos

A partir de los sobrantes sanos de las tablas de 2,8 m x 150 mm x 50 mm (2"x 6") ensayadas anteriormente se obtuvieron probetas libres de defectos. Se confeccionaron probetas para los siguientes ensayos mecánicos: de flexión estática a partir del cual fueron obtenidos el MOE y el MOR, de flexión dinámica con el que se obtuvo la resistencia al impacto y el ensayo de dureza Janka con el que se determinó la dureza.

Para este muestreo se modificó la forma de elegir la zona de donde se extraen las pequeñas probetas. Las tablas se numeraron en la zona cercana a la parte inferior de la troza, y de ahí se sacaron las probetas, de manera de tener una mayor uniformidad en la madera que se iba a ensayar.

6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climatizada (en condiciones de 20° C de temperatura y 65 % de humedad relativa) para llevarlas a un contenido de humedad cercano a 12% , logrando determinar el equilibrio de humedad en la madera mediante el peso constante. El contenido de humedad promedio de las probetas en el momento del ensayo fue de 11,6% .

Los cuadros N° 17 y N° 18 que siguen muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las probetas provenientes de todas las tablas (A, B y C).

Cuadro N° 17: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas.

	FLEXION ESTATICA			
	MOE	MOR	DENSIDAD	Contenido de
	Máquina Universal	Máquina Universal	CORRIENTE	Humedad
	(MPa)	(MPa)	(g/cm ³)	%
Número	224	225	225	225
Promedio	8086	74	0.407	12
Máximo	15149	137	0,617	13
Mínimo	3214	27	0,311	11
Desv. Est	2313	17	0,054	0,35
C.V. %	29	22	13	3,0

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

	FLEXIÓN DINÁMICA Resistencia al Impacto (J/cm ²)	DUREZA JANKA	
		Radial	Tangencial
		(MPa)	(MPa)
Número	225	225	225
Promedio	3,01	23,8	28,9
Máximo	8,90	50,9	62,6
Mínimo	0,99	10,7	12,0
Desv. Estd	1,1	7,7	10
C.V. (%)	36	32	35

En las durezas se observa que la dureza tangencial es mayor que la radial. Esto concuerda con la bibliografía y se presenta como una relación bastante constante para otras especies.

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.

El comportamiento de las pequeñas probetas libres de defectos confirma 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 dejan de la médula. Es decir aumentan a medida que aumenta la edad cambial (del cambium) de la madera.

Cuadro N° 19: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio

PROBETA	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		DENS. CORRIENTE (g/cm ³)	
		Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
A	74	6301	25	61	16	0,365	8,4
B	76	7994	21	72	16	0,401	9,0
C	75	9964	20	87	19	0,455	11

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

PROBETA	N°	RESISTENCIA AL IMPACTO (J/cm ²)		Dureza Janka radial (MPa)		Dureza Janka tangencial (MPa)	
		Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)	Promedio	C.V (%)
		A	74	2,50	39	19,2	24
B	76	2,96	35	21,8	29	26,6	33
C	75	3,55	27	30,3	23	35,7	26

En los gráficos que se muestran a continuación (Gráficos N° 26, 27 y 28) se ilustra la tendencia de las propiedades en función del radio. Para todas ellas hay un aumento en su magnitud a medida que se dejan de la médula.

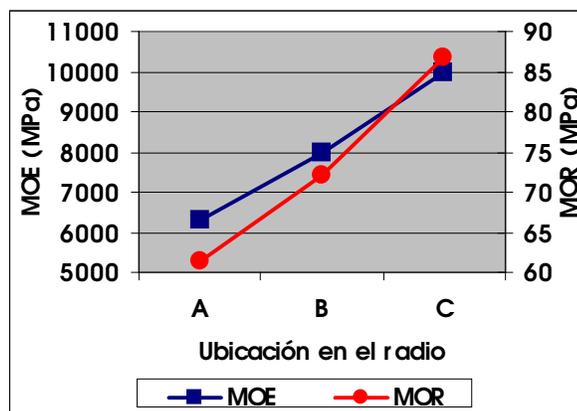


Gráfico N° 26: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio

Se observa un incremento en forma lineal a medida que nos dejamos de la médula hacia la corteza, tanto para el MOE como para el MOR. El valor de MOE de la probeta C es dos veces superior que la probeta A, y en caso de MOR la probeta C es un 25 % superior que la probeta A.

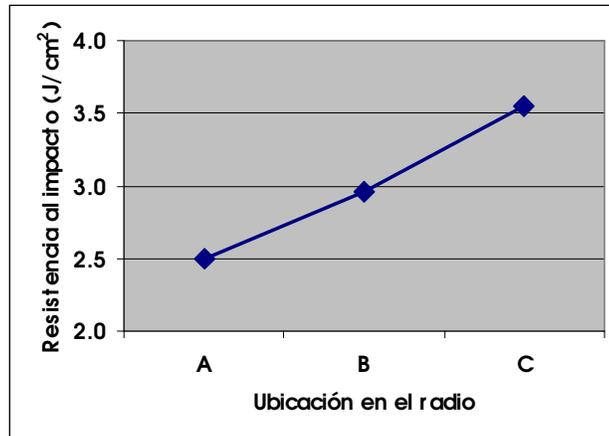


Gráfico N° 27: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio

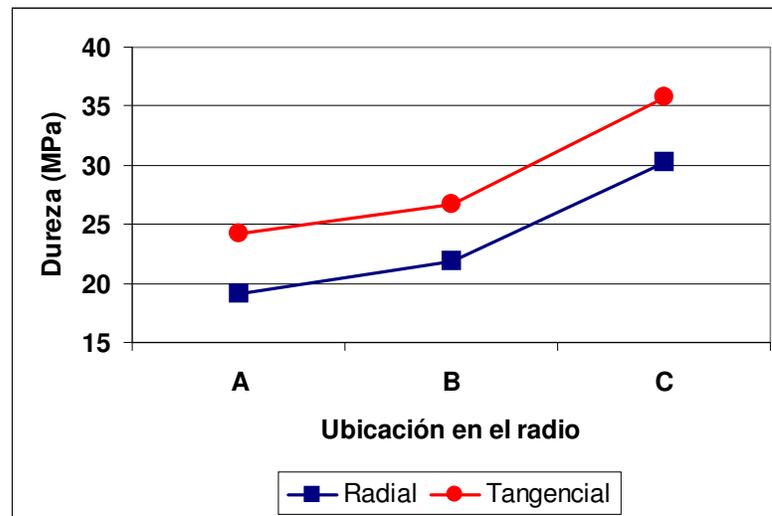


Gráfico N° 28: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio

La Resistencia al Impacto tiene la misma tendencia que el MCE y el MOR, el valor de la probeta C es un 50 % mayor que la probeta A. En la Dureza, la cara tangencial es siempre mayor que la cara radial (la cara transversal es siempre mayor que las dos caras) y la probeta C es mayor en un 40 o 50 % que la probeta A.

6.3.3. Variación de las propiedades mecánicas en la altura

La variación de las propiedades mecánicas en altura no tiene un comportamiento tan homogéneo como en el radio, pero en general se observa que los valores de las propiedades disminuyen a medida que aumenta la altura como se aprecia en el cuadro No 22.

Cuadro N° 21: 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	71	7993	36	77	26	0,428	15
2	77	8017	28	72	23	0,400	13
3	76	8255	22	72	17	0,396	9,5

Cuadro N° 22: 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	71	3,51	39	26	38	31	35
2	77	2,84	31	23	28	28	34
3	76	2,73	27	22	27	27	33

En el caso del MOR y el MOE se observa un comportamiento similar a las tablas, o sea vemos un aumento de los valores de MOE a medida que aumenta la altura, y una disminución del MOR, influenciado mayormente por la edad de la madera, ya que a medida que aumenta la altura disminuye la edad cambial en las trozas.

En la dureza y en la resistencia al impacto se observa que la evolución de las propiedades en altura presenta una tendencia clara, que es una disminución de su magnitud a medida que aumenta la altura.

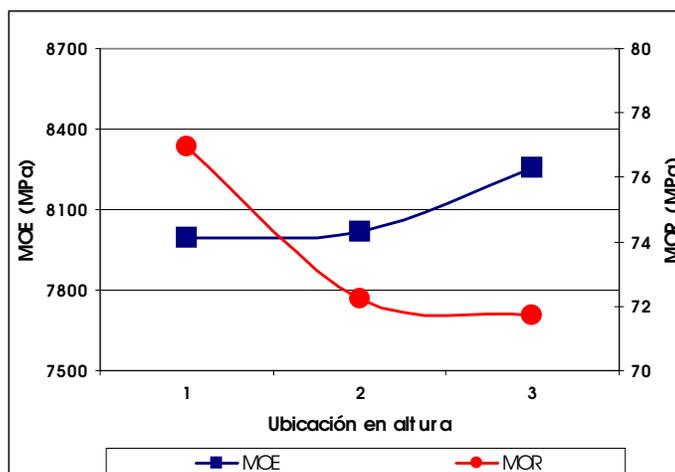


Gráfico N° 29: MOE y MOR promedio según ubicación en altura

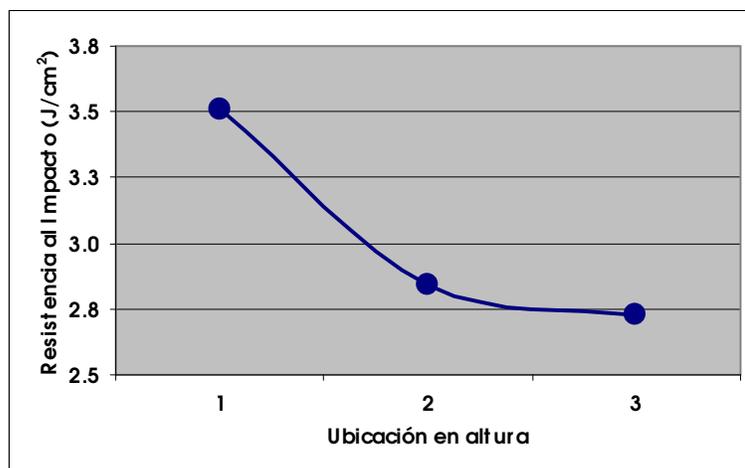


Gráfico N° 30: Resistencia al Impacto según ubicación en altura

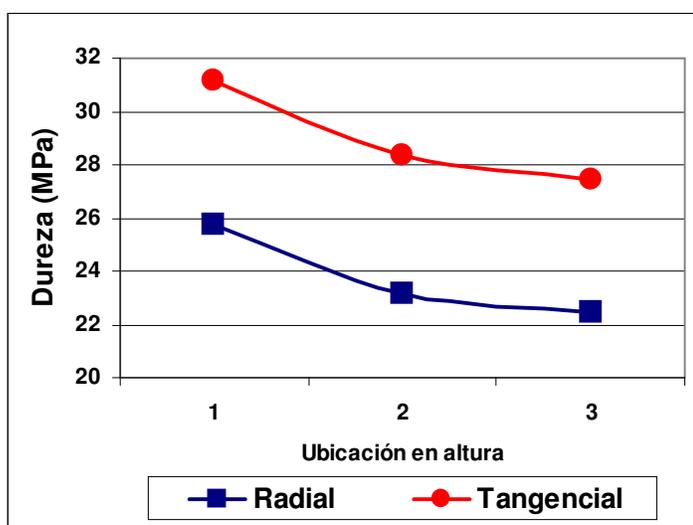


Gráfico N° 31: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en altura

6.3.4 Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en 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 cambial.

Se puede observar en los gráficos N° 32 y 33, que para la mayoría de los casos el aumento más marcado corresponde a la traza basal, cosa que es muy razonable ya que en esta traza, por ser la de mayor edad, es donde van a existir mayores diferencias de edad cambial de la madera de las distintas probetas. En el otro extremo está la traza 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 traza sucede que ciertas probetas "C" contienen madera de similar edad que la probeta "B" de la primera traza.

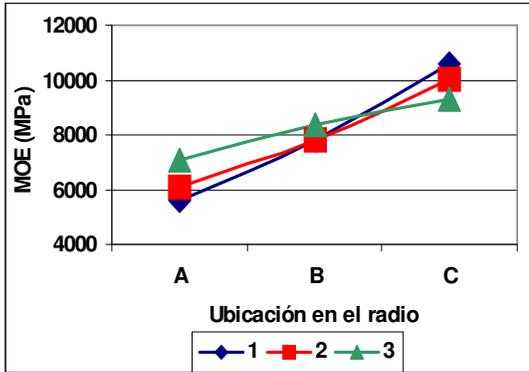


Gráfico N° 32: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

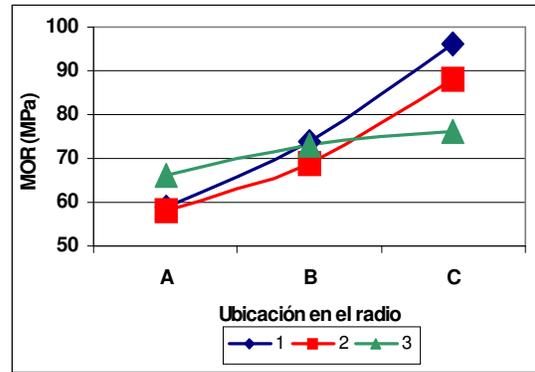


Gráfico N° 33: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

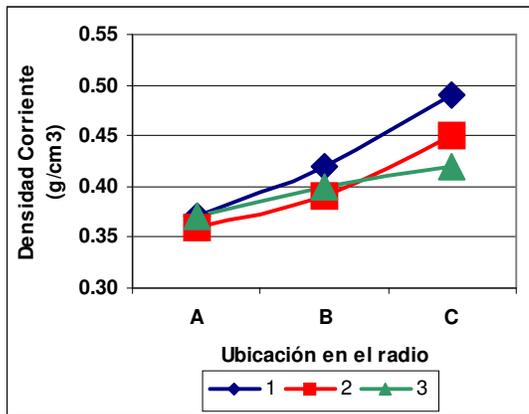


Gráfico N° 34: Densidad corriente por altura según ubicación en el radio

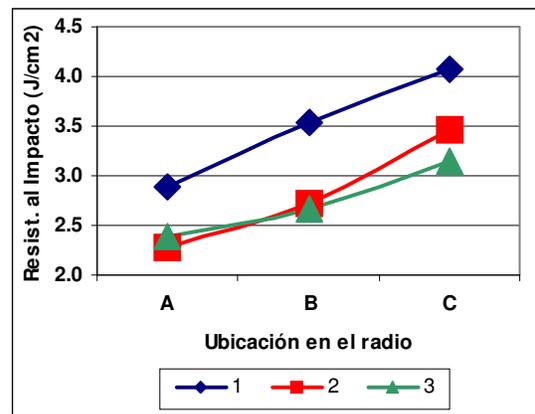


Gráfico N° 35: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio

En la dureza el comportamiento es similar entre las distintas trozas, aunque el comportamiento es más homogéneo que en estudios anteriores.

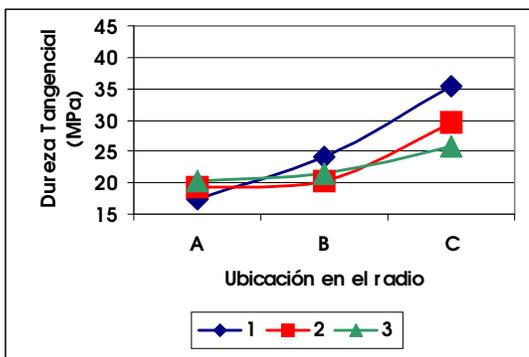


Gráfico N° 36: Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio

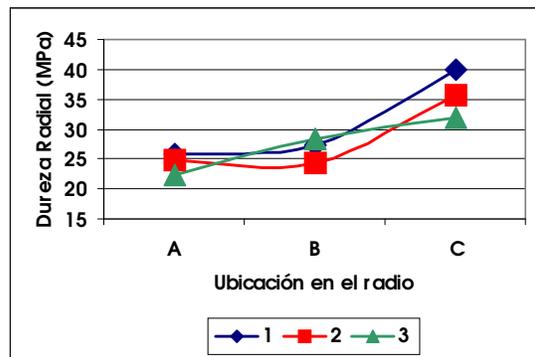


Gráfico N° 37: Dureza radial por altura según ubicación en el radio

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 una de las ubicaciones en el radio.

Se puede observar en los gráficos N° 38, 39, 40, 41, 42 y 43, 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 traza, 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 todas las cosas las probetas "A" son las que tienen los menores valores para todas las propiedades mecánicas.

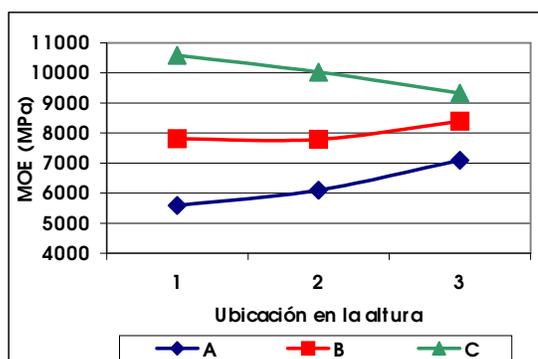


Gráfico N° 38: MOE promedio por ubicación en el radio según altura

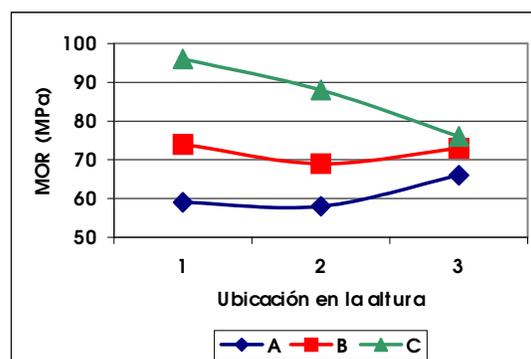


Gráfico N° 39: MOR promedio por ubicación en el radio según altura

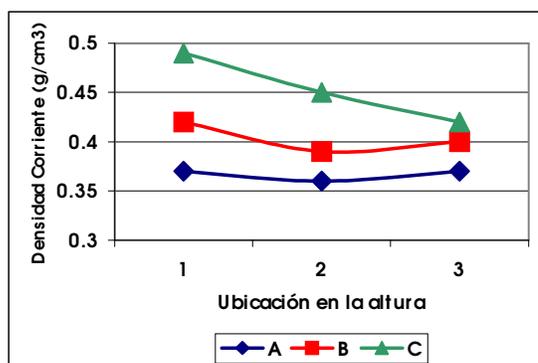


Gráfico N° 40: Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura

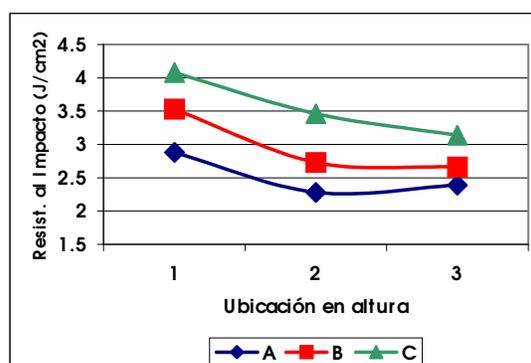


Gráfico N° 41: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

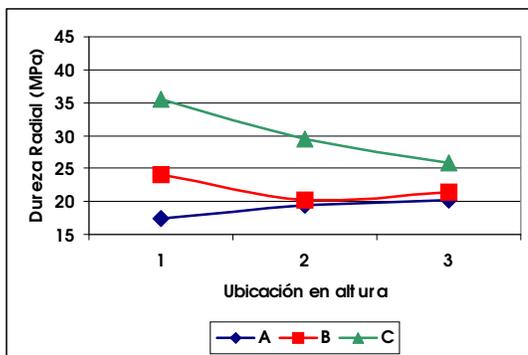


Gráfico N° 42: Dureza radial por ubicación en el radio según altura

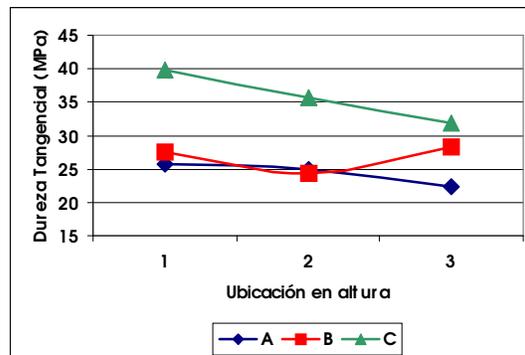


Gráfico N° 43: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura

6.3.6 Relación entre las distintas propiedades en pequeñas probetas libres de defectos

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° 23: Relaciones entre las distintas propiedades.

n = 224	MOE	MOR	Resistencia al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Densidad Corriente
MOE	1	0,874	0,284	0,438	0,353	0,663
MOR		1	0,419	0,546	0,469	0,769
Resistencia al Impacto			1	0,373	0,472	0,545
Dureza Radial				1	0,575	0,666
Dureza Tangencial					1	0,585
Densidad Corriente						1

Como se puede ver en el cuadro N° 23, las propiedades con la mayor correlación entre si son el MOE y el MOR. Las otras propiedades, como Dureza Radial con el MOR, y la Dureza Tangencial con la Dureza Radial, aumentaron notoriamente con respecto a informes anteriores, debido principalmente a el cambio de elección de el lugar en que se sacan las probetas. También correlacionaron muy bien la distintas propiedades con la Densidad Corriente.

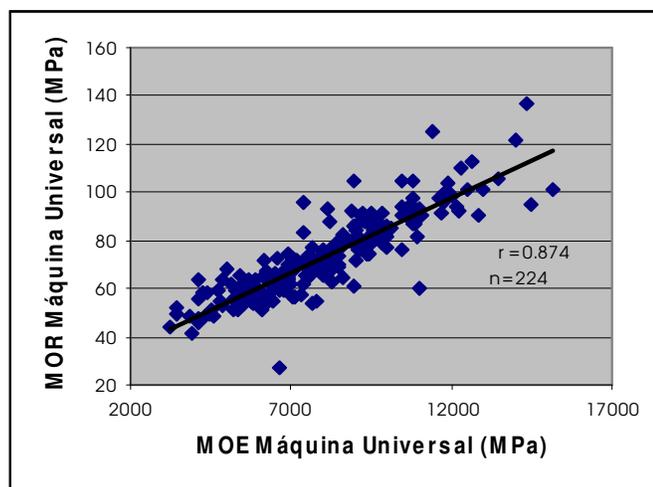


Gráfico N° 44: Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos

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

La relación entre probetas de ar y las tablas se analizó solo para las tablas "B" y "C" ya que las tablas "A" como se muestra a lo largo de este trabajo no deben ser consideradas para usos estructurales.

Cuadro N° 24: 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	150	150	151	151
Promedio	8996	79	7893	37
Máximo	15149	137	14546	90
Mínimo	3461	26	3433	8,4
Dev. Estd.	2103	16	1838	20
C.V. (%)	23	20	23	54

Se encontró cierta relación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas de ar que se obtuvieron de las mismas (gráfico N° 45, $r = 0,724$). Teniendo en cuenta esto y los resultados de otras investigaciones realizadas en pinos y eucaliptos podemos decir que el MOE es una propiedad que no es influenciada en gran medida por los nudos de la tabla sino que depende de las características de la madera. El valor medio del MOE tablas fue de 7893 MPa y el de probetas de ar 8996 MPa, este último es un 14 % superior.

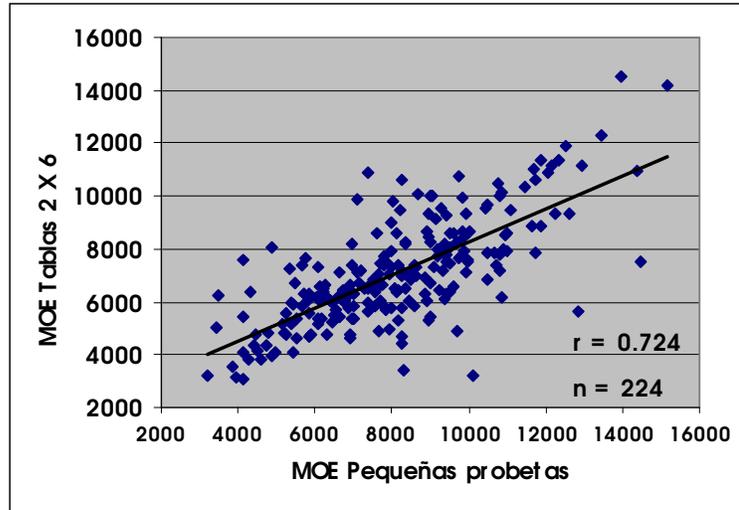


Gráfico N° 45: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

Para el MOR no se observó correlación entre los valores encontrados en tablas y en los valores de las pequeñas probetas obtenidas de estas (gráfico N° 46, $r = 0,524$). Esto es debido a que el MOR es influenciado en forma negativa por la presencia de defectos de las tablas, como los nudos, grano inclinado, etc. Para tablas el valor medio de MOR fue 37 MPa y para probetas clear fue de 79 MPa, vemos que existe una gran diferencia entre ambos valores, más de dos veces superior el valor de las probetas clear.

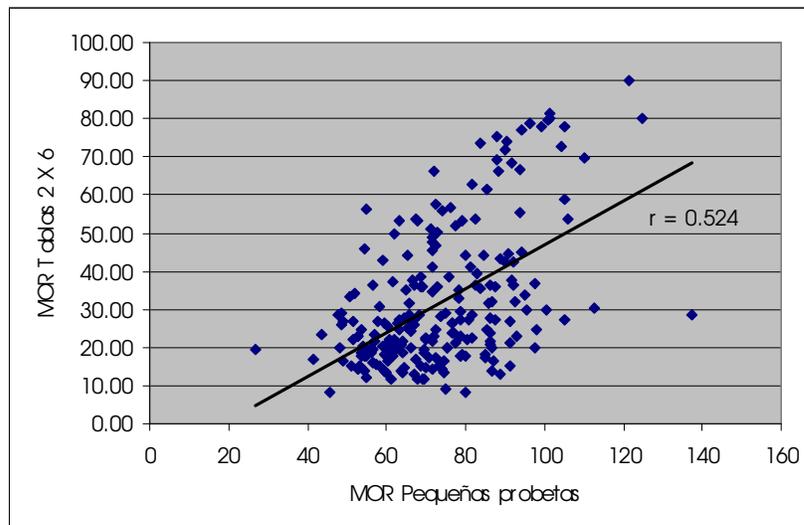


Gráfico N° 46: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

Volvemos a ver mejor correlación que en informes anteriores, nuevamente explicado por el cambio de elección de el lugar de donde se sacaron las pequeñas probetas para las ensayos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, Editorial Hemisferio Sur, 1986.
2. CORONEL, E./ Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.
3. OHTA, S.; WATANABE, H./ Mechanical Properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Japan Wood Research Society, 1968. 14 (5).
4. NAGAO, H.; NAKAI, T.; TANAKA, T./ Non destructive evaluation of bending a tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, *Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings*, Washington State Univ, and USDA Forest Products Lab., 1991.
5. PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, Informe de investigación N° 1, LATU-JICA, 2000.
6. O NEILL, H./ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos, Expoforesta, Pág. 15 a 24, 2000.
7. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus elliotii* Eng. del Litoral de Uruguay, Informe N° 1, Octubre 2002.
8. Grupo Técnico de madera Aserrada de Pino "GT 3". / Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral de Uruguay, Informe No 2, Junio 2003.

FICHA TÉCNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Especie : *Pinus taeda* L.

Ensayos realizados en 25 árboles de 23 años de edad

Localidad de origen : Rivera

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	0,408

Propiedades Mecánicas

En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 11,6 %

(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	8973	Kgf/cm ²	91499
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	8248	Kgf/cm ²	84096
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	43	Kgf/cm ²	438

En pequeñas probetas libres de defectos CH = 11,6 %

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	8086	Kgf/cm ²	82454
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	74	Kgf/cm ²	775
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm ²	3,0	Kgf.m/cm ²	0,30
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 - 94 Hardness	MPa	23,7	Kgf	242
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 - 94 Hardness	MPa	28,8	Kgf	294

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
Nº 1: Muestreo y distribución de las trazas _____	6
Nº 2: Orden en la realización de los trabajos _____	7
Nº 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	8
Nº 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de dbura y duramen en árboles en pie ____	9
Nº 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trazas mediante FFT Analyzer _____	10
Nº 6 y 7: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trazas _	11
Nº 8 y 9: Aserrado de las trazas para obtención de tablas (2"x 6") _____	11
Nº 10: Continuación de los ensayos en tablas 2"x 6" _____	12
Nº 11: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	13
Nº 12: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	13
Nº 13: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal _____	15
Nº 14: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	16
Nº 15: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	17
Nº 16: Diseño de rotura típica por tensión y por corte en área nudosa _____	26

Cuadros	Página
Nº 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	6
Nº 2: Datos técnicos del radio _____	6
Nº 3: Podas realizadas _____	7
Nº 4: Grados de clasificación de las trazas _____	8
Nº 5: Porcentaje de trazas según la categoría a la que pertenecen _____	17
Nº 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Básica _____	18
Nº 7: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio _____	18
Nº 8: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en altura _____	20
Nº 9: MOE con corteza (FFT Analyzer) según traza _____	22
Nº 10: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C) _____	24
Nº 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1ª y 2ª traza _____	25
Nº 12: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio _____	28
Nº 13: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en la altura _____	30
Nº 14: Porcentaje de tablas según categoría JAS _____	32
Nº 15: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	32
Nº 16: Número de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS _____	33
Nº 17: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	35
Nº 18: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	35
Nº 19: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	36
Nº 20: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	36
Nº 21: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	38
Nº 22: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	38
Nº 23: Relaciones entre las distintas propiedades _____	42
Nº 24: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de defectos (probetas "B" y "C") _____	43

Nº 1:	Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación radial	19
Nº 2:	Densidad Básica según anillo medio de la probeta	19
Nº 3:	Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio	20
Nº 4:	Densidad Básica por altura según ubicación en el radio	20
Nº 5:	Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura	21
Nº 6:	Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura	21
Nº 7:	Densidad Básica por probeta según ubicación en altura	21
Nº 8:	Variación de los valores de MOE entre árboles	22
Nº 9:	Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trazas con corteza según posición en altura	23
Nº 10:	Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE promedio	23
Nº 11:	Relación entre velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE para trazas de menor diámetro	24
Nº 12:	Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)	26
Nº 13:	Relación entre el MOR y el MOE	27
Nº 14:	Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)	27
Nº 15:	Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio	28
Nº 16:	MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	29
Nº 17:	MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	29
Nº 18:	MOE y MOR según ubicación en altura	30
Nº 19:	MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	31
Nº 20:	MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	31
Nº 21:	Relación entre el MOE de las trazas y el MOE promedio de las tablas obtenidas	31
Nº 22:	Proporción de tablas ensayadas según categoría JAS	33
Nº 23:	Proporción de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS	33
Nº 24:	Relación entre el MOE (Máquina Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A"	34
Nº 25:	Relación entre el MOE (Máquina Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "B" y "C"	35
Nº 26:	MOE y MOR promedio según ubicación en el radio	37
Nº 27:	Resistencia al Impacto según ubicación en el radio	37
Nº 28:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio	38
Nº 29:	MOE y MOR promedio según ubicación en altura	38
Nº 30:	Resistencia al Impacto según ubicación en altura	39
Nº 31:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura	39
Nº 32:	MOE promedio por altura según ubicación en el radio	40
Nº 33:	MOR promedio por altura según ubicación en el radio	40
Nº 34:	Densidad corriente por altura según ubicación en el radio	40
Nº 35:	Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio	40
Nº 36:	Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio	40
Nº 37:	Dureza radial por altura según ubicación en el radio	40
Nº 38:	MOE promedio por ubicación en el radio según altura	41
Nº 39:	MOR promedio por ubicación en el radio según altura	41
Nº 40:	Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura	41
Nº 41:	Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura	41
Nº 42:	Dureza radial por ubicación en el radio según altura	42
Nº 43:	Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura	42
Nº 44:	Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos	43
Nº 45:	Relación del MOE entre las probetas de ar y las tablas de las que fueron obtenidas	44
Nº 46:	Relación del MOR entre las probetas de ar y las tablas de las que fueron obtenidas	44



Dirección General Forestal



Sociedad de Productores Forestales



Asociación de Industriales de la Madera



LATU Sector Productos Forestales

<http://www.latu.org.uy>

e-mail: ftarigo@latu.org.uy / honeill@latu.org.uy