

PROPIEDADES MECÁNICAS DE
***Eucalyptus grandis* H.**
DEL NORTE DE URUGUAY



Informe N° 4

**Grupo Técnico de Madera Aserrada de
Eucalipto "GT2"
Dirección General Forestal M.G.A.P.
Sociedad de Productores Forestales
Asociación de Industriales de la Madera
LATU Sector Productos Forestales**

Agosto 2004

Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalypto

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. Pablo Iraola	Sociedad de Productores Forestales
Dr. Sadaaki Ohta	LATU Sector Productos Forestales
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. Pablo Iraola

Agradecimientos

A Compañía Forestal Uruguay S.A y Urufor S.A. por el apoyo recibido en la realización de este estudio.

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* H. DEL NORTE DE URUGUAY

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES	1
2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles	1
2.2 Características de los rodales muestreados	2
2.2.1 Datos técnicos del rodal	2
2.2.2 Manejos (podas y raleos)	3
3. ENSAYOS EN LAS TROZAS	3
3.1 Clasificación visual de trozas	3
3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica	4
3.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	5
3.4 Aserrado de trozas para obtención de las tablas (2"X 6")	6
4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6"	7
4.1 Secado de las tablas en horno industrial	8
4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual	8
4.3 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2"x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	8
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"	9
4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Corriente de tablas ensayadas	10
5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS	10
5.1 Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)	10
5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica	11
5.3 Determinación de la Dureza JANKA	12
5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente	13
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
6.1 Estudios realizados sobre trozas en estado verde	13
6.1.1 Clasificación visual	13

6.1.2	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica	13
6.1.3	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio	14
6.1.3.1	Análisis por altura según ubicación en el radio	14
6.1.4	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura	15
6.1.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	16
6.1.5	Módulo de Elasticidad de las trozas	16
6.2	Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")	18
6.2.1	Resumen de las propiedades mecánicas en tablas 2"x 6"	19
6.2.2	Relación entre las distintas propiedades mecánicas	20
6.2.3	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas	21
6.2.4	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	22
6.2.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	23
6.2.5	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en altura	24
6.2.5.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	24
6.2.6	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas	25
6.2.7	Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural	26
6.2.8	Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS	26
6.3	Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos	28
6.3.1	Resumen de las propiedades mecánicas	29
6.3.2	Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio	29
6.3.3	Variación de las propiedades mecánicas en la altura	31
6.3.4	Análisis de las propiedades mecánicas por altura según la ubicación en el radio	32
6.3.5	Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según la altura	34
6.3.6	Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas	36
6.3.7	Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos	38
6.3.8	Coefficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de tamaño real y pequeñas probetas libres de defectos	40
7	BIBLIOGRAFÍA	41
	Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Eucalyptus grandis</i> H. del Norte de Uruguay	42
	Índice de Figuras y Cuadros	43
	Índice de Gráficos	44

PROPIEDADES MECÁNICAS DE *Eucalyptus grandis* H. DEL NORTE DE URUGUAY

RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H, 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 (2"x 6") 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: *Eucalyptus grandis* H, módulo de elasticidad, módulo de rotura, densidad, no destructivo.

SUMMARY

In this report mechanical properties of *Eucalyptus grandis* H. from Rivera department northern Uruguay 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 (2 x 6 inches) by non destructive method 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: *Eucalyptus grandis* H, modulus of elasticity, modulus of rupture, density, non destructive

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 General Forestal del M.G.A.P. 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* H., *Pinus elliottii* Eng.y *Pinus taeda* L. de las zonas norte, centro, litoral y sur para estudiar las propiedades físicas y mecánicas de la madera, con el fin de caracterizarla para el uso en la construcción y su posterior clasificación.

Le atribuimos gran importancia al conocimiento y a la caracterización de las especies forestadas para la obtención de madera de buena calidad. Esta publicación pretende colaborar en el conocimiento del comportamiento de la especie *Eucalyptus grandis* implantada en el Uruguay, que en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 150.000 hectáreas. En este caso analizaremos 30 árboles de 12 años de edad raleados de un rodal del norte de nuestro país, más precisamente del departamento de Rivera.

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 (Nº 7) se realizó en enero del 2002.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 30 árboles divididos en tres clases diamétricas (9, 10 y 11 por clase). Para la selección de los árboles se evaluó el diámetro, la conicidad, la rectitud del fuste y el 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 (22 cm. de diámetro con corteza).

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.

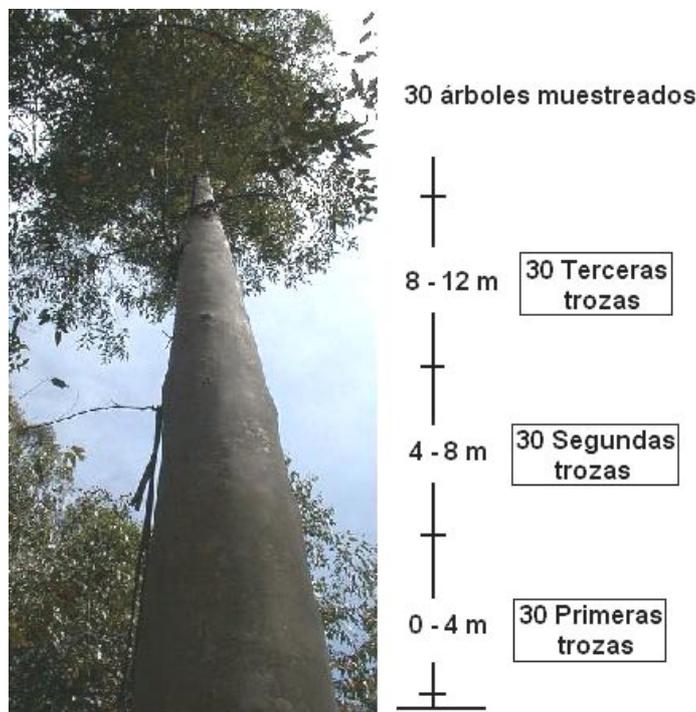


Figura N° 1: Muestreo y distribución de las trozas.

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

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

Clases diamétricas		Número de Individuos	DAP c/c Medio (cm)	Altura promedio (m)		
Clase	Rango (cm)			Total	Ø = 22 cm	1° rama viva
1	33 – 36	9	35	33,7	16,2	16,3
2	37 – 40	11	39	34,7	19,1	16,8
3	41 - 46	10	43	35,3	20,5	14,3

2.2 Características de los rodales muestreados

2.2.1 Datos técnicos del rodal

Cuadro N° 2: Datos técnicos del rodal.

Especie	<i>Eucalyptus grandis</i> H.
Localidad / Departamento	Batoví Dorado / Rivera
Año de Plantación	1989
Origen de la semilla	Facultad de Agronomía EEBM
Densidad de plantación (árboles / hectárea)	1100
Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.	7,31

2.2.2 Manejos (podas y raleos)

En el rodal muestreado no se realizaron podas, en el siguiente cuadro se presentan los manejos realizados al rodal muestreado:

Cuadro N° 3: Raleos realizados.

Raleos		
Número	Edad (años)	Densidad remanente (árb./ha)
1	7	400

3. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 72 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 rectitud, 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) 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.

3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica.

Una vez finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas, dejándolas de 3 m de longitud. Del metro del extremo superior 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 ésta 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 denominó "A" a la probeta próxima a la médula, "B" la ubicada en una zona intermedia, ambas con gran proporción de duramen y la "C" la próxima a la corteza conformada por albura (Ver figura N° 3).

La razón de tomar tres probetas bien definidas en el radio es la de permitir estudiar la variación de la médula a la corteza. En otros estudios con mayor profundidad se extrajeron mayor cantidad de probetas en el radio, lo que permite estudiar las variaciones con mayor precisión (leño tardío y temprano, zona de transición entre madera juvenil y adulta, etc). 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 cercana a la médula y que se distribuye en el radio hasta cierto anillo de crecimiento (esto varía dependiendo de la especie y de la edad del árbol) 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 eucaliptos de plantaciones jóvenes.

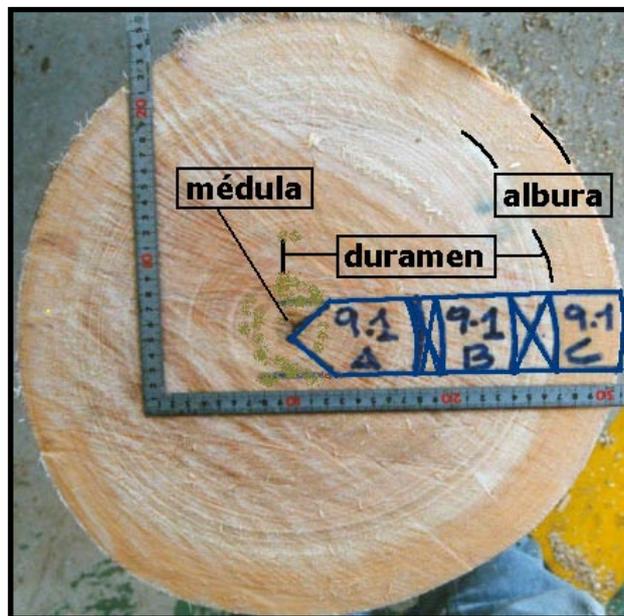


Figura N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas.

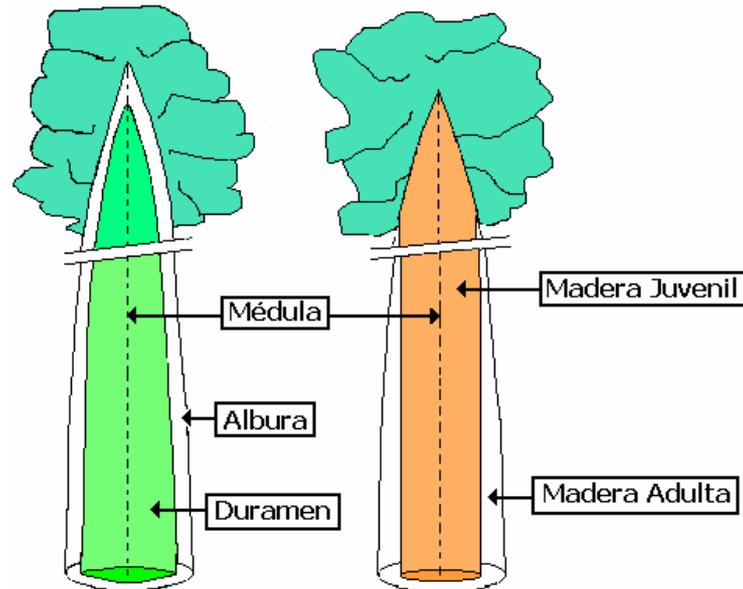


Figura N° 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie.

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 ésta sumergida.

Las probetas posteriormente fueron secadas en una estufa a $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 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:

$$D_{básica} = \frac{P_{Anh}}{V_V}$$

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

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

$D_{básica}$: Densidad aparente básica
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 (Rápida 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:

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

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

E_{ft}	: MOE por vibración longitudinal
L	: Longitud de la troza
fl	: Frecuencia de vibración longitudinal
g	: Constante de aceleración gravitacional
n	: n° de nodo = 1
ρ	: Densidad (troza verde, en ensayo)

Finalizado el ensayo de las trozas, se procedió a descortezar y ensayar nuevamente a alguna de ellas, de forma de estimar los valores del MOE sin corteza y poder correlacionarlos con los valores de MOE con corteza.



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: "BA" la que se extrajo contigua a la médula, por consiguiente madera juvenil, "B" tablas distantes de la médula (zona intermedia) con diferentes porcentajes de madera adulta y juvenil y "C" tablas próximas a la corteza con una mayor proporción de madera adulta. (ver la siguiente figura N° 6).

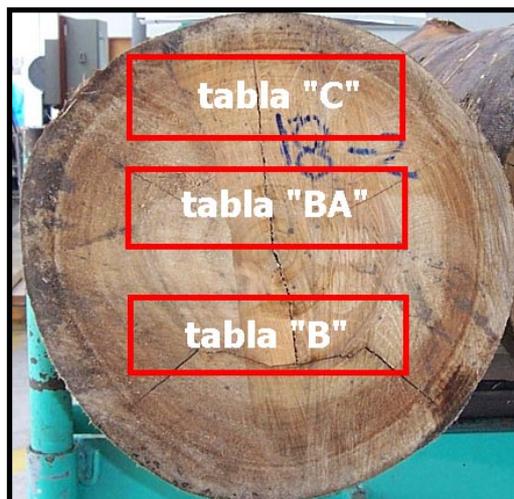


Figura N° 6 : Esquemas de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA-B-C en las trozas.



Figura N° 7 : 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
Determinación del Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer, método no destructivo)
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

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 11,3 %. 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 éstas 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 con escuadrías 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 área libre de defectos (clear) para cada una de las tablas, la razón de área nudosa (KAR) y la razón de diámetro nudoso (KDR).

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 determinó el volumen por medio de las dimensiones.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

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

<p>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)</p>
--



Figura N° 8: 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° 9)

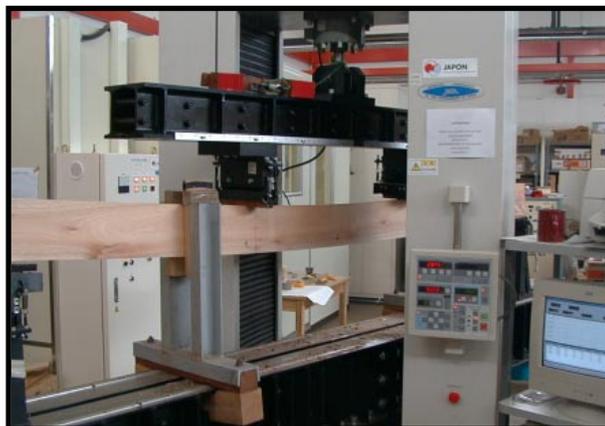
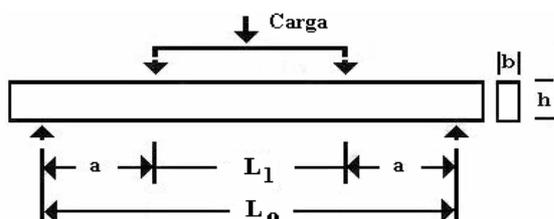


Figura N° 9: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

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 el software de 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.
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.

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

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 y el lugar en que se produjo la rotura.

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

De las partes sobrantes del ensayo mecánico de flexión estática (50 x 150 x 2800 mm) se confeccionaron probetas escuadradas 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 $103 \pm 2^\circ$ C hasta peso constante para obtener el peso anhidro.

Para la determinación de la densidad aparente 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:

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

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

$D_{\text{corriente}}$: Densidad aparente corriente
$V_{\text{corriente}}$: Volumen a 11,3 % CH
P_{Anh}	: Peso anhidro
$P_{\text{corriente}}$: Peso corriente
CH	: Contenido de Humedad (%)

Nota: La densidad aparente corriente se define como el cociente entre el peso anhidro y el volumen a 12% CH. En este trabajo se estimó la densidad aparente corriente a partir del volumen a 11,3 % CH promedio para las tablas y a 11,6% CH promedio para las pequeñas probetas libres de defectos.

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 (paralelos). 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 pequeños 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 x 25 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° 10)

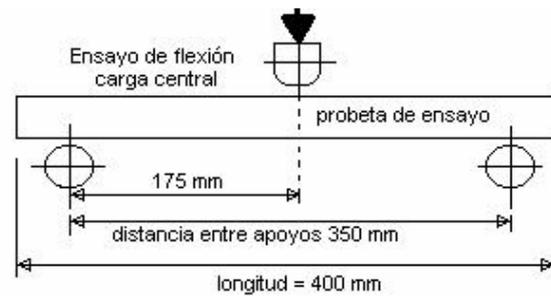


Figura N° 10: Esquema y ensayo de flexión estática en 3 puntos en máquina universal

Para este ensayo se utilizó la norma JIS (Japan Industrial Standard) Z 2101–1994 (JIS Z 2113-63) "Method of Bending Test for Wood".

Las fórmulas 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)
 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 x 20 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 formula:

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

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



Figura N° 11: 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 x 45 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 ($\varnothing = 11.3$ mm) a una velocidad de 6 mm/min. 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° 12)

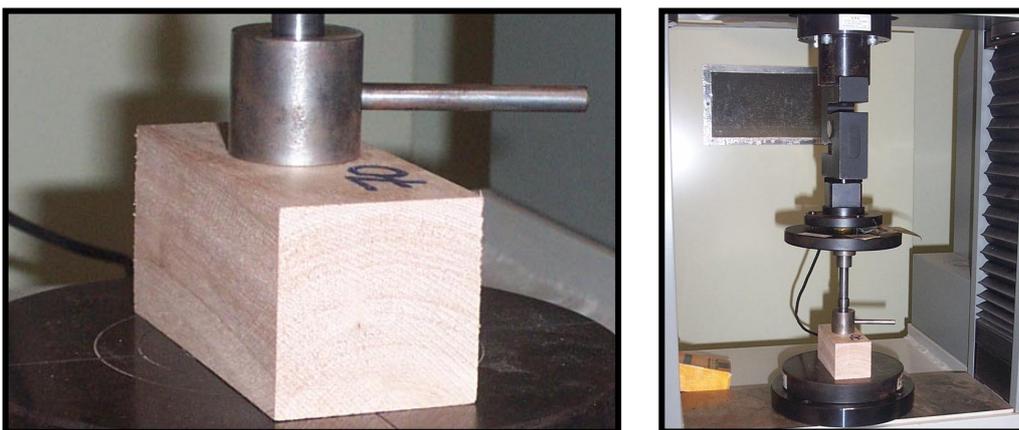


Figura N° 12: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.

5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente

Una vez finalizados los ensayos en pequeñas probetas, se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente 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, 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 altura de troza el porcentaje de las mismas que pertenecen a cada grado. El criterio de clasificación está descrito en el capítulo 3.1.

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

	GRADO			
	I	II	III	IV
Troza 1	57	30	13	0
Troza 2	0	50	47	3
Troza 3	0	37	47	16

Recordemos que el rodal sólo fue raleado a los 7 años y sus árboles remanentes no fueron podados. Esto concuerda con lo observado en el cuadro, donde en las trozas basales hay preponderancia de trozas de grado I y II, en segundas trozas predomina el grado II y III no existiendo el grado I, y en las terceras trozas hay una preponderancia de trozas de grado II, III y menor medida IV, también no existiendo en estas últimas el grado I.

6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 97,5 %, se observaron 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 edad, 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 aparente básica promedio fue de 0,432 g/cm³ encontrándose variaciones 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 Aparente Básica

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Aparente Básica (g/cm ³)
Número	215	215
Promedio	97,5	0,432
Máximo	169,8	0,586
Mínimo	33,8	0,344
Desv. std.	24,3	0,038
CV (%)	25,0	8,9

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

Para el contenido de humedad y la densidad aparente básica se encontró que existe variación en el radio y en altura. En el radio, el contenido de humedad aumenta desde una ubicación próxima a la médula (en este caso probetas "A") pasando por la zona central (probetas "B") y siendo mayor en la zona cercana a la corteza (probetas "C"), vemos también que existe una mayor variabilidad en las probetas "B". En el caso de las coníferas estudiadas con anterioridad (Informes N° 1 y N° 2 Grupo Técnico de Madera Aserrada "GT3", *P. elliotti* y *P. taeda*, respectivamente) observamos también que el mayor contenido de humedad se daba en la zona media del radio (probetas "B"). El conocimiento de esta variación nos permite optimizar los programas de secado y de impregnación para las tablas, dependiendo de donde son obtenidas las tablas respecto a su ubicación en el radio.

La densidad aparente básica se comporta de la misma forma, aumenta a medida que nos alejamos de la médula. Los valores de la densidad no varían significativamente según la ubicación en el radio, en todas las ubicaciones tampoco existen grandes diferencias en los coeficientes de variación. (Ver Cuadro N° 7 y Grafico N° 1)

Cuadro N° 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio

Probeta	N°	Humedad (%)			Densidad Ap. Básica (g/cm ³)		
		Media	Desv. Std.	CV (%)	Media	Desv. Std.	CV (%)
A	71	88,5	13,2	13,9	0,417	0,032	7,7
B	72	91,9	14,8	16,1	0,423	0,029	7,0
C	72	122,7	15,1	12,4	0,442	0,039	8,7

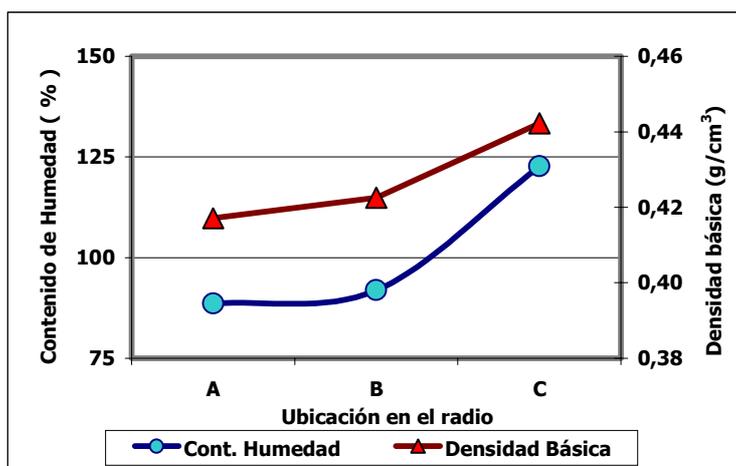


Gráfico N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial

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

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 se observó en el promedio. Las diferencias entre alturas están dadas básicamente por las distintas características de la madera, las que podrían ser influidas por la proporción de albura y por la distinta relación

madera juvenil / madera adulta (pero recordemos que son árboles jóvenes de 12 años), que encontramos en las tres alturas.

Podemos observar también en los gráficos 2 y 3 que el contenido de humedad y la densidad básica se comportan en forma inversa, es mayor en la primer troza el contenido de humedad y en la densidad es la más baja, presentando para ambas propiedades las segundas trozas valores medios.

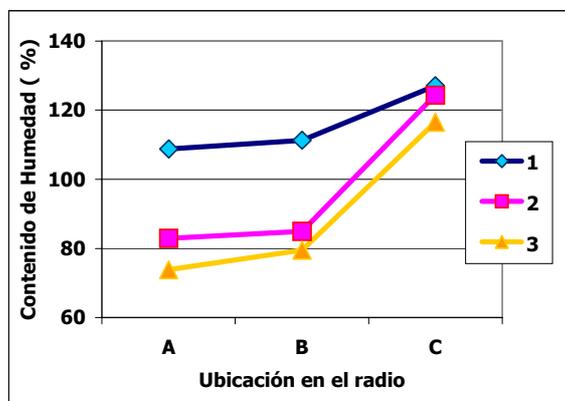


Gráfico N° 2: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio

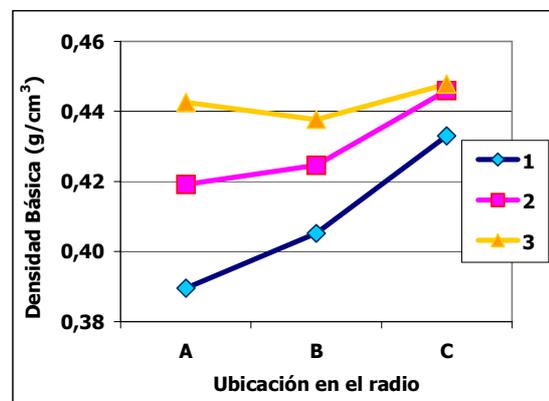


Gráfico N° 3: Densidad Aparente Básica por altura según ubicación en el radio

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

En cuanto a la variación en altura, el contenido de humedad promedio disminuyó a medida que aumentaba la altura, siendo menor en la tercer troza, mientras que la densidad básica aumentó con la altura, siendo superior en la tercer troza. En el caso de las coníferas estudiadas con anterioridad, esta tendencia del contenido de humedad y de la densidad básica es inversa, aumenta la humedad y disminuye la densidad en altura.

Cuadro N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm ³)		
		Media	Desv. std.	CV (%)	Media	Desv. std.	CV (%)
1	36	115,7	17,3	15,3	0,409	0,027	6,6
2	90	97,4	13,9	14,2	0,430	0,037	8,5
3	89	89,9	11,9	12,9	0,443	0,037	8,3

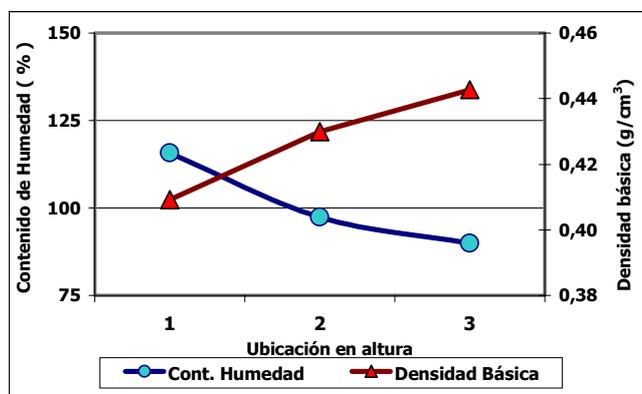


Gráfico N° 4: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura

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 sólo el valor absoluto de la propiedad para cada caso. Observamos que la variación de la humedad de las probetas "C" en la altura no es tan importante como para las "A" y "B". En cuanto a los valores de la densidad básica, las diferencias entre las distintas alturas y las ubicaciones en el radio, no son tan importantes como lo son para el contenido de humedad. Para todas las alturas, las probetas "C" muestran los valores más altos, seguidas de las "B" y luego de las "A". Es importante destacar que en la tercer troza no se observa gran diferencia entre los valores de la densidad básica según sea de la ubicación "A", "B" o "C". (ver gráficas N° 5 y 6).

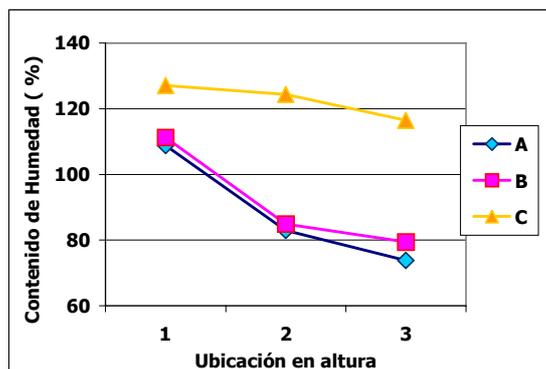


Gráfico N° 5: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura

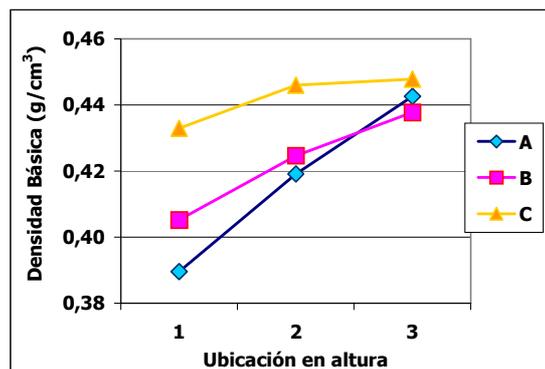


Gráfico N° 6: Densidad Ap. Básica por probeta según ubicación en altura

6.1.5. Módulo de Elasticidad de las trozas

El MOE promedio de las trozas analizadas (30 de cada altura) es de 11861 MPa, existiendo una variación importante de los valores individuales de las trozas.

Se observó también una gran variación en los valores de MOE entre árboles, existiendo un rango de valores que van desde 9000 a más de 13000 MPa (Ver gráfico N° 7). Un 67 % de los árboles presentan valores de MOE entre 11000 y 13000 MPa. Se tomó como valor del árbol el promedio de los valores de las tres trozas (primera, segunda y tercer troza).

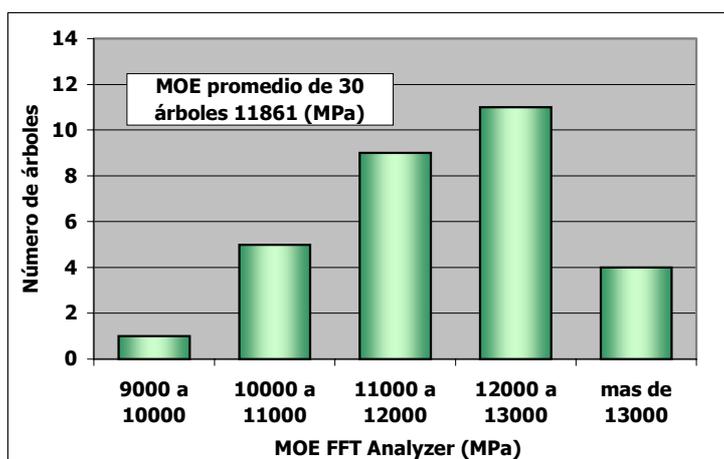


Gráfico N° 7: Variación de los valores de MOE entre árboles

Existió un patrón de variación para las trozas dentro de un mismo árbol. El valor más alto de MOE se encontró en la tercer troza, seguido de la segunda troza y luego de la primera.

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

Árbol N°	MOE Trozas sin corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
Media	10687	12066	12783	11861
Máximo	12196	14297	15675	13973
Mínimo	8582	9643	10590	9605
Desv. Std.	900	1052	1114	936
CV (%)	8,4	8,7	8,7	7,9

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%.

En el caso del *Eucalyptus grandis* que nos ocupa se ensayaron todas las trozas muestreadas, pero con el fin de estudiar la diferencia de los valores MOE con y sin corteza se ensayaron 25 de ellas distribuidas en las tres alturas. La correlación entre las dos determinaciones fue alta de $r = 0,904$. La tendencia también indica que a medida que aumentamos la altura aumentan los valores promedio de MOE, para las tres alturas el valor de MOE sin corteza fue superior, en las primeras trozas un 9,0 %, en las segundas trozas 9,1 % y las terceras trozas un 7,9 %. (Ver gráficos N° 8 y 9).

Que exista alta correlación entre los dos valores de MOE 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 por su resistencia.

Por otra parte, en estudios realizados anteriormente tanto en *Pinus taeda* y *elliottii* como en *Eucalyptus grandis* pudimos constatar que existe una buena relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de la totalidad de las tablas obtenidas de dichas trozas.

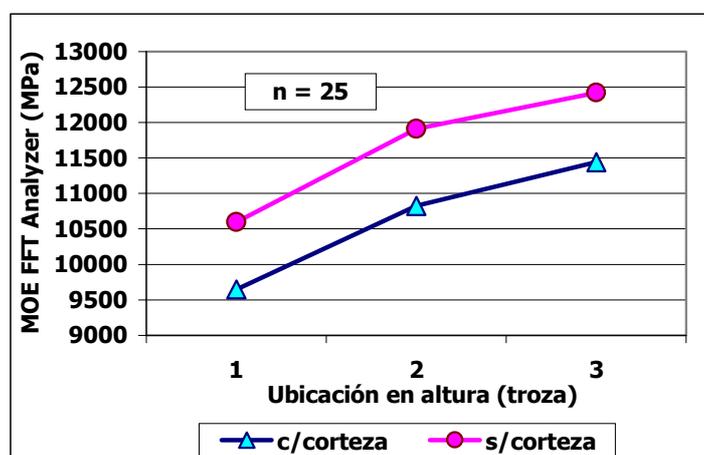


Gráfico N° 8: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza según la posición en altura

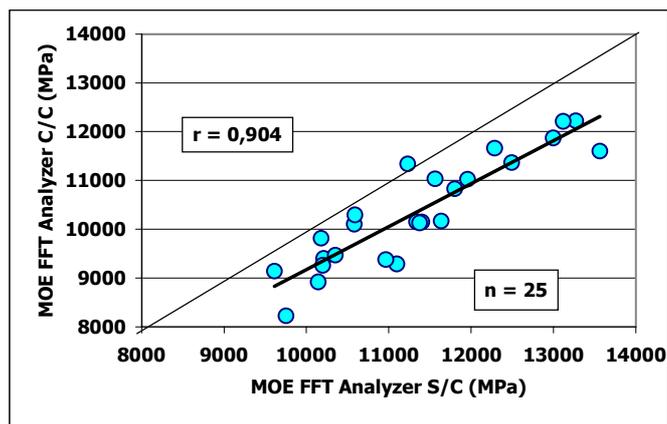


Gráfico N° 9: Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza

No se encontró relación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento que para este estudio se expresó como diámetro a altura de pecho (DAP), este hecho nos permite decir que en este estudio la calidad de la madera no depende de la velocidad de crecimiento ($r = -0,422$), recordemos que son árboles de 12 años de edad y que los diámetros son menores a los 50 cm, quizás en el futuro, si estos árboles alcanzarán mayores edades y mayores diámetros esta relación pueda mejorar. (Ver gráfico N° 10)

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

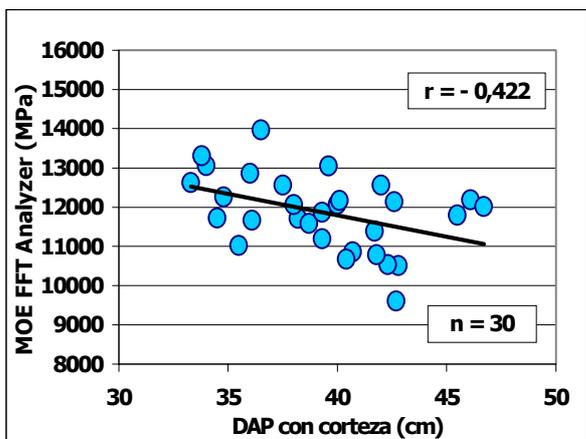


Gráfico N° 10: Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP)

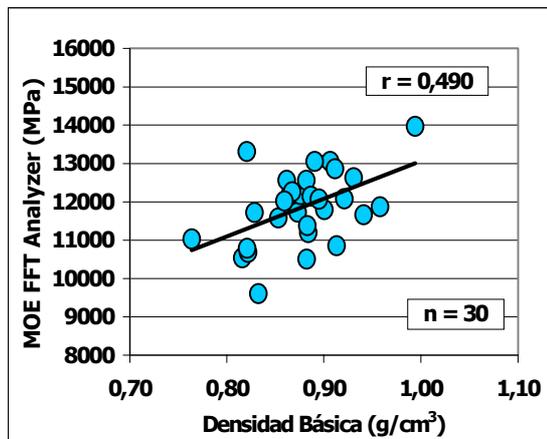


Gráfico N° 11: Relación entre MOE FFT Analyzer y la Densidad Aparente Básica (Condición verde)

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

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) en tablas secas y dimensionadas (50mm x 150mm x 2.8 m) mediante dos ensayos mecánicos uno no destructivo, por el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, utilizando el equipo FFT Analyzer y otro destructivo, el ensayo de flexión estática en máquina universal donde se determinaron el MOE y el módulo de rotura (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 11,3 %.

6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas 2"x 6"

En el cuadro N° 10 se muestran los promedios de las propiedades estudiadas para todas las tablas obtenidas del aserrado de las trozas ("BA", "B" y "C"). En estos promedios se incluyen las tablas "BA" ya que éstas a diferencia de las tablas ensayadas en las especies de pinos, no contienen médula, la que fue descartada en el aserrado.

Veremos más adelante que no existen grandes diferencias en los valores de las propiedades entre las ubicaciones "BA" y "B".

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

	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm ³)
Número	203	203	203	203
Promedio	13302	11607	50,6	0,459
Máximo	17633	18484	76,2	0,564
Mínimo	8357	7076	17,7	0,378
STD	1567	1664	13,9	0,039
CV (%)	11,8	14,3	27,5	8,0

En el cuadro anterior se puede ver que el valor mínimo del MOR es bajo, la tabla N° 69 obtenida de la segunda troza y de ubicación "B" tiene un valor de 17,7 MPa, la tabla N° 172 de la primera troza con ubicación "BA" con un valor de 19,5 MPa (con el MOE más bajo 7076 MPa), en ambos casos fue debido a la presencia de nudos de mediano tamaño cercanos a la zona en que se ejerce el esfuerzo de tensión. 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. Podemos observar la variación que existe en el MOR con un coeficiente de variación de 27%.

Más adelante en este informe veremos la gran influencia que tienen la presencia de nudos en el comportamiento de la madera en el ensayo de flexión, afectando los valores del MOE pero significativamente los valores del MOR.

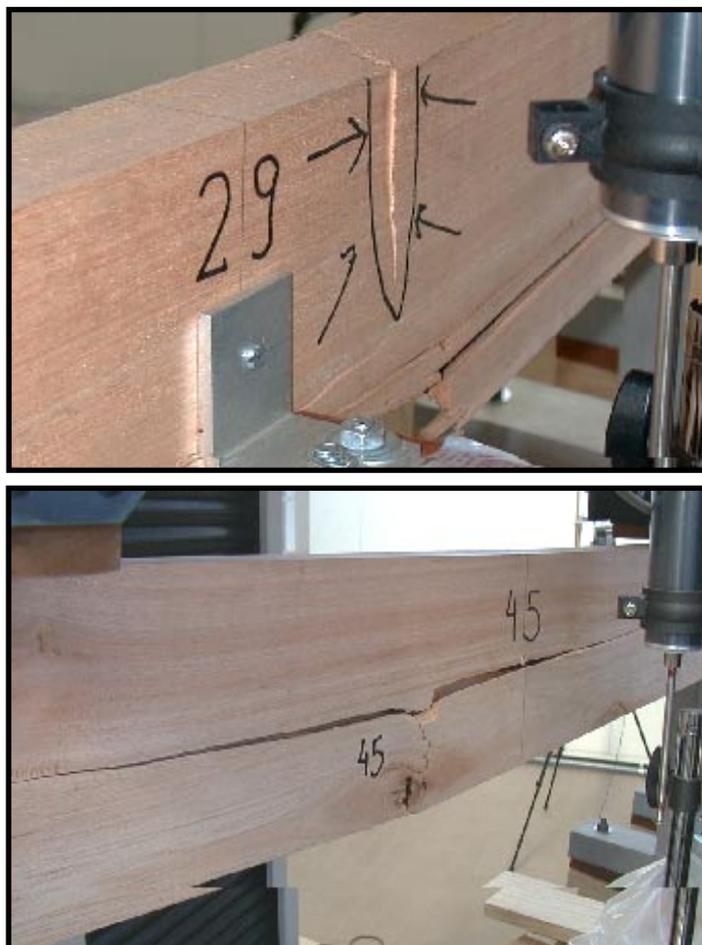
Más adelante también veremos en detalle como se distribuyen los valores de las tablas dentro de las categorías estructurales (según norma JAS).

En el cuadro N° 11 veremos el resumen de los valores promedio de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" provenientes de las primeras y segundas trozas

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

	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
	MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm ³)
Número	104	104	104	104
Promedio	13312	11789	50,6	0,459
Máximo	17400	18484	76,2	0,534
Mínimo	9578	8052	17,7	0,378
STD	1359	1675	14,4	0,036
CV (%)	10,2	14,2	28,4	7,7

De los valores promedio de las propiedades analizadas en los cuadros N° 10 y 11, se puede concluir que la influencia de las tablas "BA" y de la totalidad de las tablas de las terceras trozas no es significativa en los resultados. Esto nos hace ver que para la especie y edad analizada se podría hacer un uso integral de la madera producida en la totalidad del ancho del radio (excluyendo la médula) y en las tres alturas.



Figuras N° 13 y 14: Tipo de rotura por compresión y tensión

En las figuras N° 13 y 14 podemos observar a modo de ejemplo dos tablas que presentan diseños de rotura en la zona central y que se pueden considerar típicos en el ensayo de flexión estática, presentando valores de MOR normales o dentro de los valores medios.

La tabla superior presenta un diseño de rotura claramente influenciado por compresión en la zona central, la tabla inferior muestra el diseño de rotura influenciado por la tensión.

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 correlación ($r = 0,790$) entre ambos, esto nos permitiría el uso del FFT Analyzer como herramienta para la estimación no destructiva del MOE. Debemos tener en cuenta que los valores promedio de MOE obtenidos mediante el uso del FFT Analyzer son para este muestreo un 12,9 % superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal. Vemos también que a medida que los valores MOE suben, la diferencia entre los valores de los dos métodos es menor (ver Gráfico N° 12). Mas adelante veremos la importancia de esta diferencia en más del valor obtenido por el método no destructivo en el momento de evaluar la madera para uso estructural.

En trabajos anteriores observamos también la buena correlación que existe entre ambos métodos utilizados para la determinación del MOE y también los resultados obtenidos con otros equipos similares no destructivos como el Pundit, el Fakopp, Sylvatest, etc.

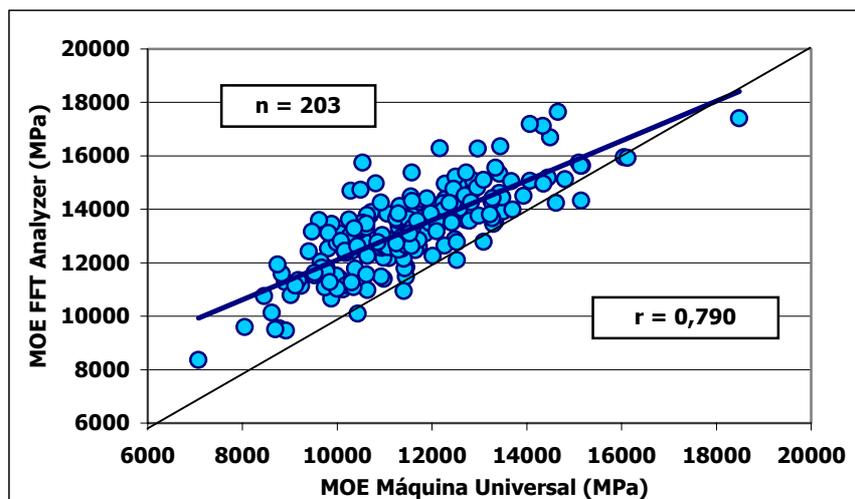


Gráfico N° 12: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)

En las tablas no se encontró una alta correlación entre el MOE y el MOR, esto se debe a que el MOR está muy condicionado por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el MOE, que está más influido por las características de la madera y la edad cambial. Podemos ver en el gráfico N° 13, a modo de ejemplo que para un valor de MOE de 12000 (MPa) existe una variación de valores de MOR de 25 a 75 (MPa).

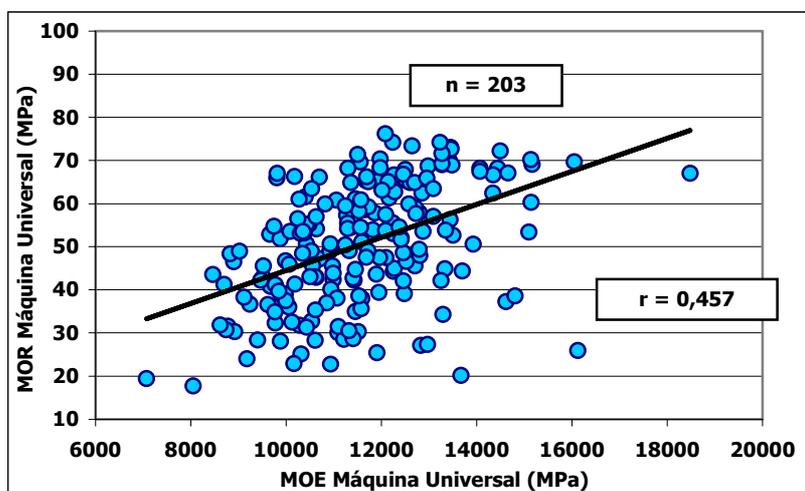


Gráfico N° 13: Relación entre el MOR y el MOE

6.2.3 Relación entre la Densidad Aparente Corriente y las propiedades mecánicas

Se analizó la relación de las propiedades mecánicas, del MOE y el MOR con la densidad corriente, no se encontró una correlación significativa en ninguno de los dos casos. En el caso del MOE para las tablas "BA" un $r = 0,403$, para las tablas "B" un $r = 0,125$ y las "C" un $r = 0,117$ como muestra el gráfico N° 14. Existe para un mismo valor de densidad una amplia dispersión de los valores en ambas propiedades mecánicas. Tampoco se encontró correlación cuando se analizan las probetas todas agrupadas.

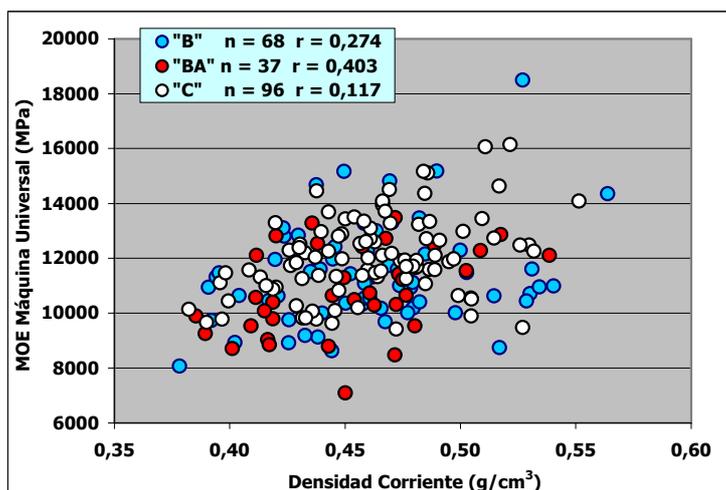


Gráfico N° 14: Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)

En el gráfico anterior existe un valor puntual de MOE (alto) sensiblemente superior a los demás, pertenece a la tabla N° 201 de la segunda troza y de ubicación "B", con su zona central totalmente libre de defectos, un valor de MOE de 18484 MPa, un MOR de 67 MPa y una densidad aparente corriente de 0,527 g/cm³. Este valor se podría haber descartado, pero se incluyó para mostrar la variabilidad que existe en la madera. Observaremos más adelante que la probeta clear obtenida de esta tabla luego del ensayo de flexión de tamaño real (2" x 6"), es la que tiene el mayor valor de MOE 17069 MPa, una densidad corriente de 0,542 g/cm³ y también un valor de MOR de los más altos 108,5 MPa.

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

La variación del módulo de elasticidad en el radio muestra una tendencia muy clara, aumenta a medida que las tablas se alejan de la médula, pasando por madera juvenil madera de transición y madera adulta cerca de la corteza. En el caso del módulo de rotura la tendencia es similar pero en la zona de transición o "B" los valores promedios son los más bajos, siendo también los valores de las probetas "C" los más altos.

Las tablas "C" son las que presentaron los mayores valores para las propiedades mecánicas, pero podemos ver que no existió gran variación entre los valores promedios de las tablas para todas las ubicaciones. Veremos en capítulos posteriores que casi la totalidad de las tablas "BA", "B" y "C" serían aptas para uso estructural, superarían el límite de 7850 (MPa) de módulo de elasticidad. (ver Cuadro N° 12 y Gráfico N° 15)

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

Ubicación de la tabla	Número de Tablas	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap. Corriente (g/cm ³)
		MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	
BA	37	12317	10747	49,6	0,454
B	68	12932	11204	46,5	0,463
C	96	13787	12044	54,5	0,464

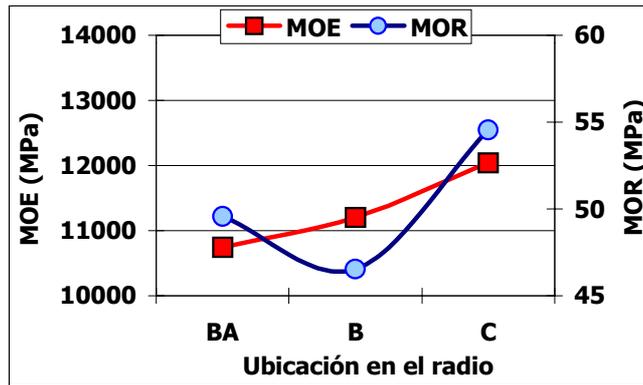


Gráfico N° 15: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio

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, salvo para las tablas provenientes de la primer troza que en las ubicaciones "BA" y "B" son significativamente menores, seguramente por la influencia de madera juvenil (Gráfica N° 16).

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

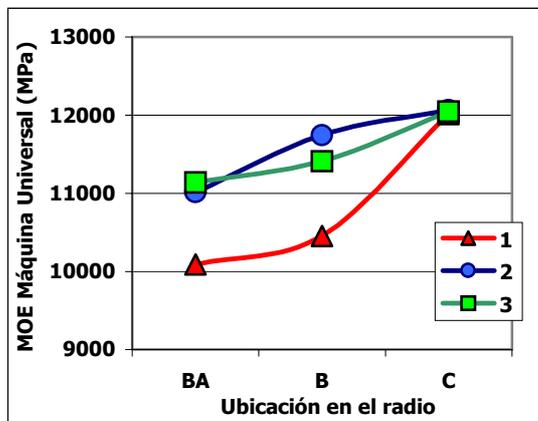


Gráfico N° 16: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

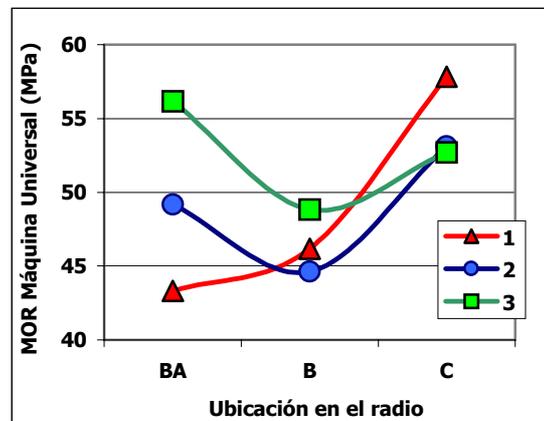


Gráfico N° 17: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura

En cuanto a los valores de MOR (gráfica N° 17) vemos que las tablas "BA" tienen diferencias significativas en las tres alturas, mientras que en las tablas "B" y "C" estos valores son similares. Debemos estudiar en el futuro este comportamiento con ensayos de esta especie de otros sitios. En otros estudios realizados vimos que el comportamiento del MOE es muy similar al del MOR en el radio según la ubicación en la altura.

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

Los valores promedio de MOE aumentan a medida que subimos en la altura siendo superiores en la segunda troza, para el MOR los valores promedio son más altos en la tercer troza, siendo muy similares los valores de la primer y segunda troza.

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

Altura	Número de tablas	FFT Analyzer	Máquina Universal		Densidad Ap.
		MOE (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Corriente (g/cm ³)
1	40	12425	10853	49,1	0,471
2	91	13096	11609	49,0	0,450
3	70	13515	11533	52,6	0,460

Se puede ver en el cuadro N° 13 y en el gráfico N° 18 que la altura no afecta en mayor medida a los valores promedio de MOE y de MOR. En cuanto al MOR vemos que el comportamiento de la tercer troza no se ve afectado por la presencia de nudos (no se realizaron podas). En cuanto a la densidad corriente los valores promedio son muy similares en todas las alturas, siendo levemente superior en la primera y en la tercera troza.

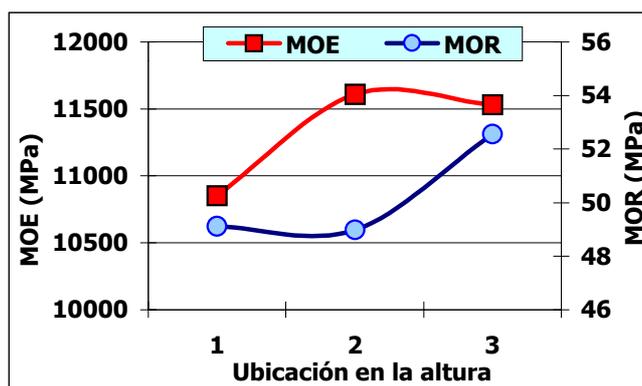


Gráfico N° 18: MOE y MOR según ubicación en altura

6.2.5.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación del módulo de elasticidad promedio en altura para cada una de las ubicaciones en el radio, observamos un comportamiento muy diferenciado entre las tablas "C" y las "BA" y "B", en las tablas "C" no existe diferencia de los valores en las tres alturas, en cambio para las tablas "BA" la tendencia es muy clara, aumenta a medida que suben en la altura, las "B" aumentan en altura pero en la segunda troza se observan los valores superiores. En cuanto al módulo de rotura se observa que las tablas "BA" y "B" tienen un comportamiento similar y aumentan con la altura, las tablas "C" disminuyen con la altura y tienen un comportamiento similar al resto de las tablas en la tercer troza. (Gráficos N° 19 y 20).

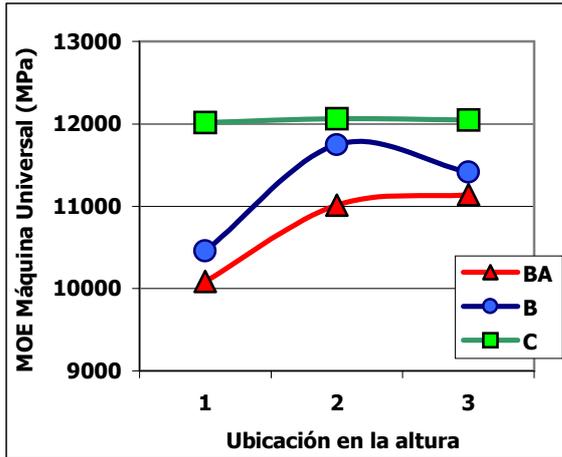


Gráfico N° 19: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

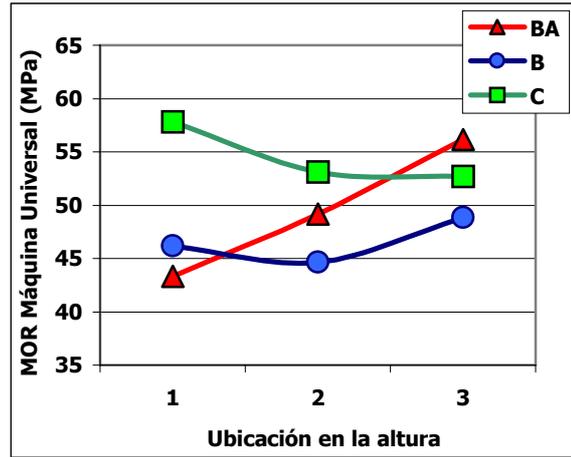


Gráfico N° 20: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

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.

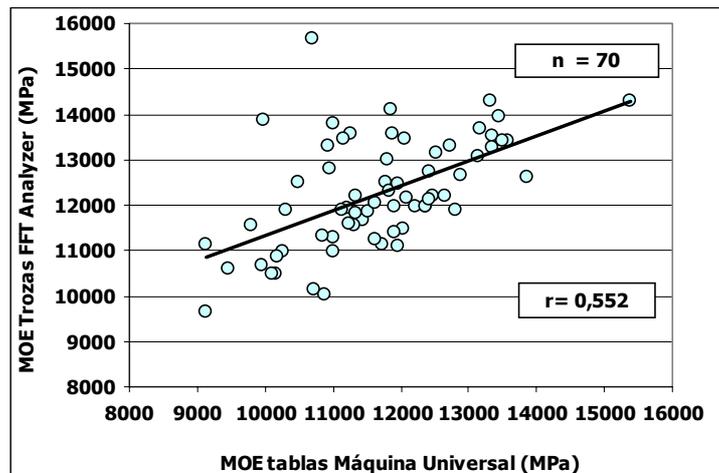


Gráfico N° 21: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas

Se encontró cierta relación entre los dos métodos ($r = 0,552$), en otros estudios anteriores observamos que este coeficiente de correlación es superior. El menor volumen de madera ensayada en las tablas que en las trozas (valor medio de tres tablas por troza), hace que en este estudio este coeficiente sea menor. La importancia de que exista una buena correlación entre estos métodos radica en que el FFT Analyzer puede ser apto en la estimación del MOE en forma práctica, rápida y no destructiva. De esta forma permite una adecuada clasificación por resistencia mecánica en la industria, en el patio de trozas, en el monte, etc.

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

Siguiendo el mismo procedimiento que utilizamos en los informes 1, 2 y 3 de esta serie de publicaciones del Grupo Técnico de Madera Aserrada, en que nos referíamos a coníferas, tendremos en cuenta la clasificación de las tablas según la norma JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de uso estructural.

En el gráfico N° 22 se muestra cómo se relacionan el MOE obtenido en ensayo de flexión estática con la máquina universal y el obtenido mediante el FFT Analyzer, con el propósito de poder visualizar la magnitud y la dispersión de los valores para los distintos tipos de tablas y también si dichas tablas entran dentro de las categorías estructurales.

Observamos que la correlación relativamente buena para todas las ubicaciones de las tablas, siendo menor en las tablas "C", que a su vez son las que tienen un número mayor de especímenes. Este hecho nos permite utilizar para la estimación del MOE de las tablas, el método no destructivo FFT Analyzer.

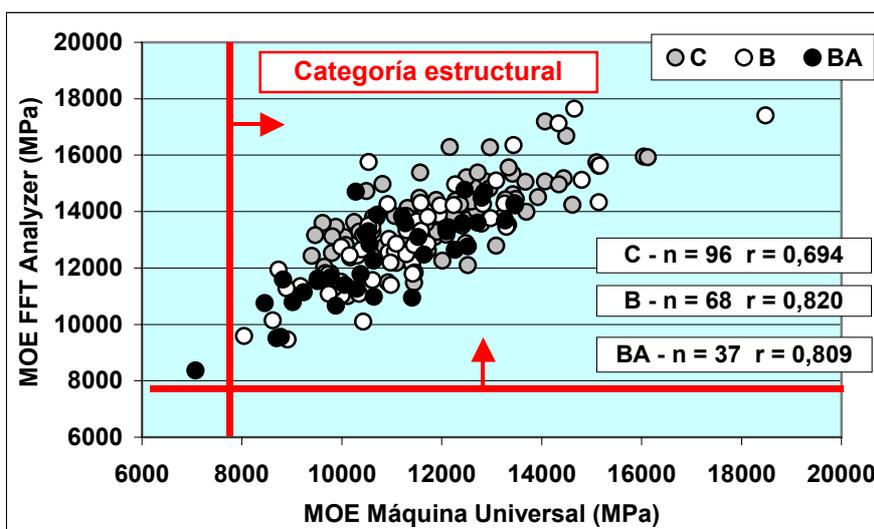


Gráfico N° 22: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "BA", "B" y "C"

Se puede observar también en el gráfico anterior que una sola tabla "BA" se encuentra por debajo del límite de 7850 MPa y no calificaría como madera para uso estructural. También vemos que existe una tendencia a agruparse estas tablas "BA" en la zona de menor valor, seguramente debido a la influencia de la mayor proporción de madera juvenil. Para las tablas "B" la distribución es más homogénea a lo largo del rango de valores y las tablas "C" tienden a extenderse por la zona de mayor valor. Estas distribuciones las podemos ver presentadas de otra forma en el gráfico N° 24.

6.2.8 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 E 90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa), la madera puede ser utilizada con fines estructurales en la construcción.

Para el caso de los *Pinus taeda* y *elliottii* estudiados y publicados sus resultados en los informes 1, 2 y 3 del Grupo Técnico de Madera Aserrada, un porcentaje no superior al 44% de las tablas se encontraron en la categoría E 90 o mayor. Podremos ver que en el *Eucalyptus grandis* que nos ocupa la totalidad de las tablas, salvo una se encuentran en la categoría E 90 o superior.

Es importante decir que la evaluación de las tablas se basó en los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de flexión estática en máquina universal y hemos visto en este trabajo y en otros realizados en pinos y eucalyptus que existe una diferencia en el MOE promedio obtenido mediante el FFT Analyzer de aproximadamente un 10 % superior a los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo en máquina universal. De lo anterior concluimos que para realizar la misma clasificación o evaluación de la madera para uso estructural basada en el MOE 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 (203)	Porcentaje (%)
< E 50		< 3920	0	0
E 50	40 – 60	3920 – 5880	0	0
E 70	60 – 80	5880 – 7850	1	0,5
E 90	80 – 100	7850 – 9810	26	12,8
E 110	100 – 120	9810 – 11770	89	43,8
E 130	120 – 140	11770 – 13730	70	34,5
E 150	140 – 160	13730 – 15690	14	6,9
> E 150	> 160	> 15690	3	1,5

En el cuadro N° 14 y el gráfico N° 23 representamos la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que entre los rangos E 90 y E 130 se concentra un 90 % de las tablas ensayadas. A partir de la categoría E 90 inclusive la madera sería apta para uso estructural. Entre las categorías E 110 y E 130 se concentra el 78 % de las tablas.

En el cuadro N° 15 y el gráfico N° 24 vemos esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla (BA-B-C), donde la totalidad de las tablas "B" y "C" son iguales o mayores a la categoría E 90 y de las tablas "BA" solo una está en la categoría E 70 y no calificaría como madera estructural. En las categorías E 110 y E 130 se concentran un 72,9 % de las tablas "BA", un 76,5 % de las tablas "B" y un 81,3 % de las tablas "C"

Cuadro N° 15: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS

Categoría JAS	MOE 10 ³ kgf/cm ²	MOE (MPa)	Tablas BA		Tablas B		Tablas C	
			Cant.	(%)	Cant	(%)	Cant	(%)
< E 50	< 40	< 3920	---	---	---	---	---	---
E 50	40 - 60	3920-5880	---	---	---	---	---	---
E 70	60 - 80	5880-7850	1	2,7	---	---	---	---
E 90	80 - 100	7850-9810	9	24,3	10	14,7	7	7,1
E 110	100 - 120	9810-11770	16	43,2	37	54,4	35	36,5
E 130	120 - 140	11770-13730	11	29,7	15	22,1	43	44,8
E 150	140 - 160	13730-15690	---	---	5	7,4	9	9,4
> E 150	> 160	> 15690	---	---	1	1,5	2	2,1
Porcentaje de tablas de categoría estructural			97,2		100		100	

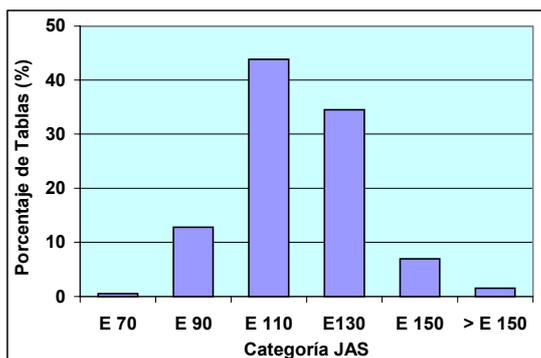


Gráfico N° 23: Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS

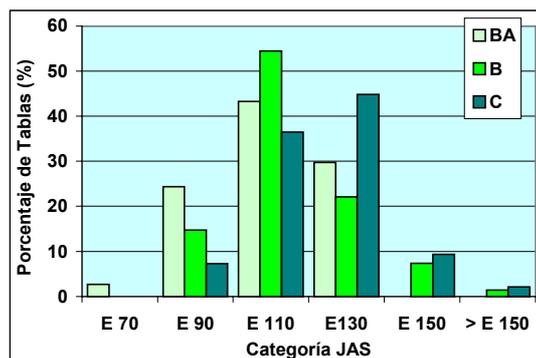


Gráfico N° 24: Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS

Analizamos el porcentaje de tablas BA-B-C que según la norma JAS calificarían como madera para uso estructural, discriminándolas también por la altura del fuste (primer, segunda y tercer troza). Recordemos que a partir de la categoría E 90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa) la madera sería apta para uso estructural. Vemos en el cuadro N° 16 que el mayor porcentaje de las tablas se concentra en las categorías E 110 y E 130 y que la mayoría de las tablas con valores altos se encuentran en las segundas trozas.

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

Troza 1		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	9	3	33,3	5	55,6	1	11,1	0	0,0	0	0,0
B	11	2	18,2	9	81,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0
C	19	2	10,5	5	26,3	11	57,9	1	5,3	0	0,0
Total	39	7		19		12		1		0	

Troza 2		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	17	4	23,5	7	41,2	6	35,3	0	0	0	0,0
B	32	4	12,5	17	53,1	7	21,9	3	9,4	1	3,1
C	42	2	4,8	17	38,1	19	45,2	4	9,5	1	2,4
Total	91	10		40		32		7		2	

Troza 3		E 90		E 110		E 130		E 150		> E 150	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
BA	10	2	20,0	4	40,0	4	40,0	0	0,0	0	0,0
B	25	4	16,0	11	44,0	8	32,0	2	8,0	0	0,0
C	35	3	8,6	14	40,0	13	37,1	4	11,4	1	2,9
Total	70	9		29		25		6		1	

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 pequeñas probetas libres de defectos, para los siguientes ensayos mecánicos: de flexión estática a partir del cual se determinó 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.

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 (BA, B y C).

Cuadro N° 17: Resumen de las propiedades mecánicas MOE y MOR de pequeñas probetas libres de defectos

	FLEXIÓN ESTÁTICA			
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Dens. Ap. Corr. (g/cm ³)	Cont. De Humedad (%)
Número	203	203	203	203
MEDIA	11766	83,2	0,453	11,6
Máximo	17069	116,3	0,596	12,8
Mínimo	8978	61,0	0,355	8,7
Desvío std.	1414	10,2	0,043	0,36
CV (%)	12,0	12,3	9,4	3,1

Cuadro N° 18: Resumen de las propiedades mecánicas Flexión Dinámica y Dureza Janka de pequeñas probetas libres de defectos

	FLEXIÓN DINÁMICA	DUREZA JANKA		
	Resistencia al Impacto (J/cm ²)	Radial (MPa)	Tangencial (MPa)	Transversal (MPa)
Número	202	201	201	30
MEDIA	4,30	31,7	35,1	52,5
Máximo	8,57	66,9	66,3	64,0
Mínimo	1,22	14,7	18,7	40,7
Desvío std	1,47	8,1	8,6	6,63
CV (%)	34,3	25,4	24,6	12,6

En las durezas se observa que la transversal es mayor que la tangencial y ésta a su vez es mayor que la radial. Esto concuerda con la bibliografía y se presenta como una relación bastante constante para otras especies. También observamos que los coeficientes de variación para la flexión dinámica y las durezas radiales y transversales son altos.

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 (BA, B, C).

El comportamiento del MOE de las pequeñas probetas libres de defectos acompaña lo observado para las tablas de tamaño estructural, aumenta a medida que la probeta se aleja de la médula. En el MOR y la densidad corriente los valores promedio son similares entre ellos en las tres ubicaciones, pero a diferencia de los ensayos en tablas el valor promedio mayor se observa en la ubicación "B".

Recordemos las características particulares de la madera eucalyptus (porosidad difusa, largo de fibra, etc.) que lo diferencian de los pinos, podemos observar esto si comparamos las tendencias y variaciones del MOE y el MOR en el radio, en pinos las diferencia entre las ubicaciones radiales es netamente superior.

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

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Ap. Corr.(g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
BA	39	11373	11,1	82,4	12,0	0,450	8,2
B	68	11638	14,9	84,2	14,9	0,460	11,4
C	96	11812	10,3	83,1	11,0	0,453	8,3

Cuadro N° 20: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka 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 (%)
BA	39	4,05	27,8	30,0	24,4	35,4	23,4
B	68	4,44	32,7	32,5	24,3	35,3	23,9
C	96	4,43	34,5	32,2	25,6	35,5	25,3

En los gráficos siguientes N° 25, 26 y 27 veremos claramente lo anteriormente mencionado, donde se ilustra la tendencia de las propiedades en función del radio.

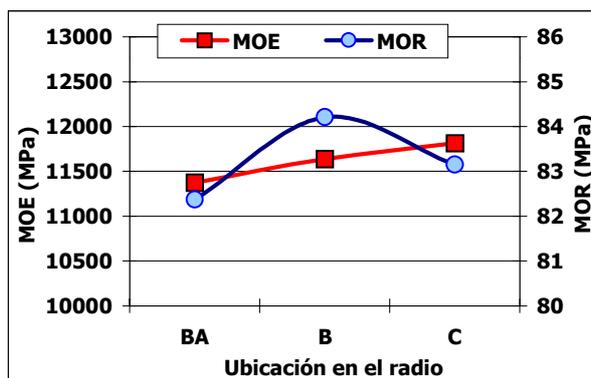


Gráfico N° 25: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio

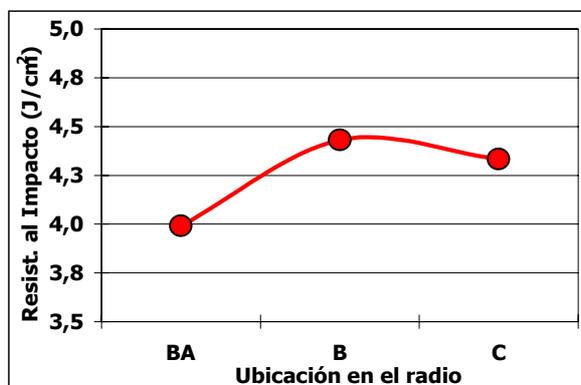


Gráfico N° 26: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio

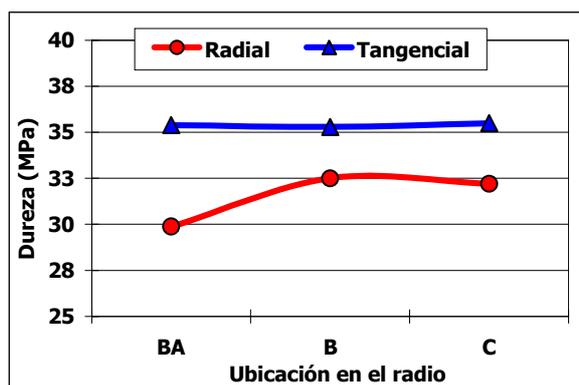


Gráfico N° 27: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio

6.3.3. Variación de las propiedades mecánicas en la altura

La variación de las propiedades mecánicas en altura tiene un comportamiento homogéneo como en el radio, pero en general se observa que los valores de las propiedades no disminuyen a medida que aumenta la altura, como sucede con los pinos, sino que aumenta el MOE con la altura, disminuye el valor promedio de MOR en las tablas de la segunda troza y en el resto de las propiedades las diferencias no son significativas.

Cuadro N° 21: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en altura

Troza	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Ap. Corr. (g/cm ³)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	40	11006	10,8	83,7	14,1	0,458	10,0
2	91	11584	11,7	81,4	11,4	0,445	8,9
3	72	12233	11,6	84,7	12,3	0,460	9,0

Cuadro N° 22: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka 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	40	4,63	25,6	31,8	26,0	37,1	23,0
2	91	4,20	36,1	31,0	23,6	33,8	22,6
3	72	4,09	33,3	31,7	24,6	35,2	27,0

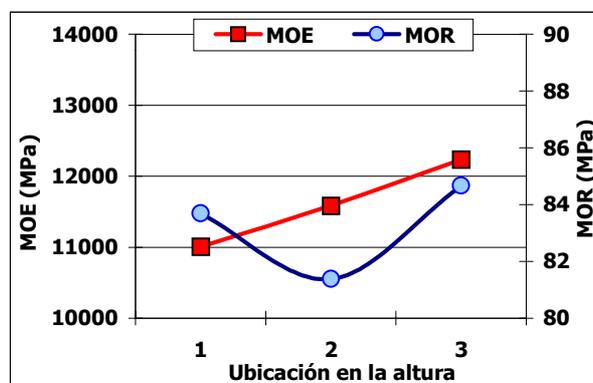


Gráfico N° 28: MOE y MOR promedio según ubicación en altura

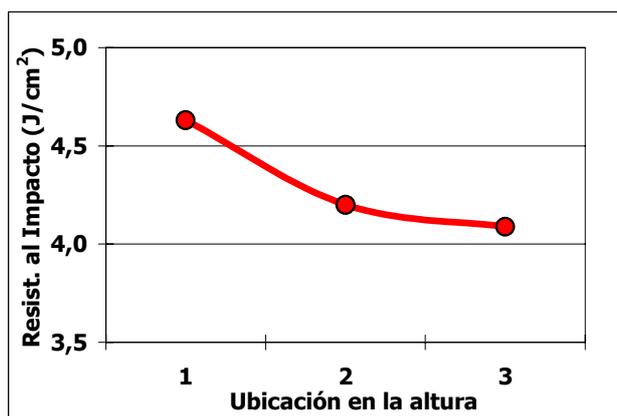


Gráfico N° 29: Resistencia al Impacto según ubicación en altura

La menor magnitud de las propiedades en la tercer troza se debe a que en está existe una mayor proporción de madera juvenil y también a la presencia de nudos de mayor tamaño en las tablas, todo esto lleva a que en las probetas clear obtenidas a partir de estas tablas tengan una mayor ocurrencia de grano inclinado. Esta última característica afecta a todas las propiedades pero en mayor medida a la resistencia al impacto.

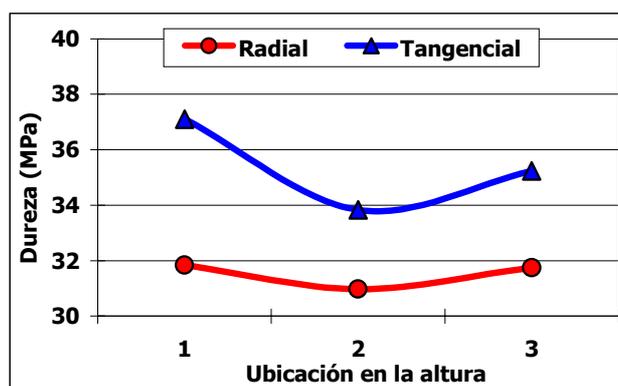


Gráfico N° 30: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en altura

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

En este capítulo se busca analizar la variación de las propiedades en el radio para cada una de las tres alturas consideradas.

El comportamiento radial del MOE en las tres alturas, es bastante similar en la segunda y tercera troza, pero este es mayor en la ubicación "B", en la primer troza el valor más alto se da en la ubicación "C". Siendo los valores de MOE más bajos en la primer troza, intermedios en la segunda troza y altos en la tercer troza. Este comportamiento ya lo hemos visto en páginas anteriores. (Ver gráfico N° 31)

El comportamiento radial del MOR en las tres alturas es similar al del MOE en la segunda y tercer troza; los valores más altos se dan en la ubicación "B", en la primer troza las ubicaciones "BA" y "C" tienen valores muy parecidos y son menores que en la ubicación "B". También observamos valores de MOR superiores en la tercer troza, intermedios en la primer troza y menores en la segunda troza. (Ver gráfico N° 32)

La densidad se comporta de igual forma que el MOR, mayor en la ubicación "B" para la segunda y tercer troza, mayor valor de todas las ubicaciones en la tercera, menor valor en todas las ubicaciones en la segunda, con valores intermedios en la primera, pero en esta última los valores superiores están en la ubicación "C". (Ver gráfico N° 33)

La resistencia al impacto tiene un comportamiento similar a la densidad en las trozas uno y tres, aumenta de "BA" a "C", siendo los valores de la primer troza superiores en todas las ubicaciones, el comportamiento de la segunda troza es diferente el valor superior se da en la ubicación "B", pero igual en las ubicaciones "BA" y "C" que la tercer troza. (Ver gráfico N° 34)

En la dureza radial un valor muy similar se da en la ubicación "BA" para todas las alturas, en las trozas segunda y tercera se observa un comportamiento similar, no existe prácticamente diferencia en las ubicaciones "BA" y "C" y siendo mayor en la posición "B". En la primer troza se puede ver similares valores en las ubicaciones "BA" y "B" y sensiblemente superiores en la posición "C". (Ver gráfico N° 35)

Con respecto a la dureza tangencial podemos decir que en las trozas uno, dos y tres son prácticamente iguales los valores en la ubicación "B", muy similares en todas las ubicaciones para la tercer troza e inversos los valores en las ubicaciones "BA" y "C" para la primer troza mayores y segunda troza menores. (Ver gráfico N° 36)

En general la tendencia para todas las alturas es similar a la tendencia promedio, correspondiendo las menores magnitudes a la madera juvenil (probetas "BA") y aumentando con la edad cambial.

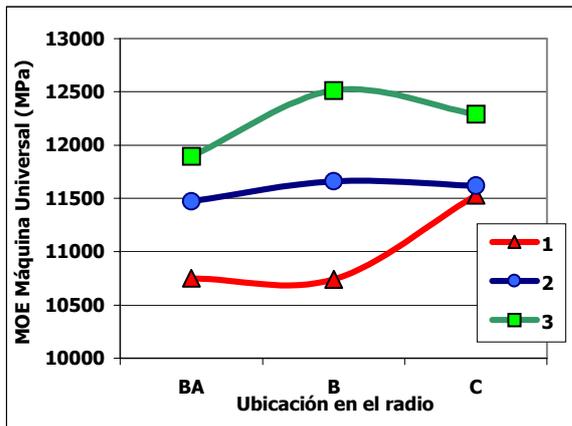


Gráfico N° 31: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

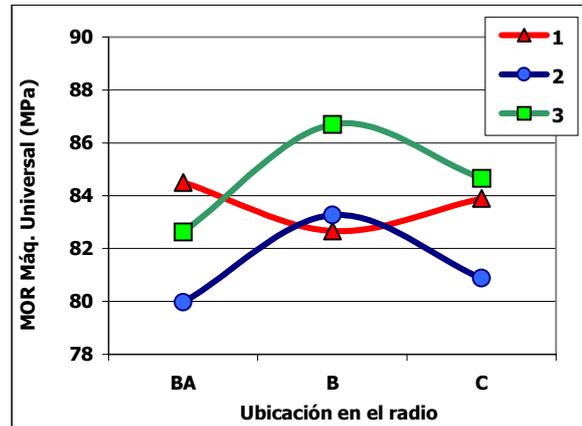


Gráfico N° 32: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

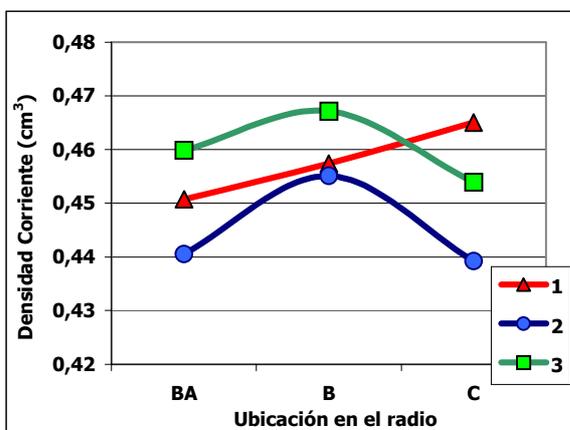


Gráfico N° 33: Densidad Ap. Corr. por altura según ubicación en el radio

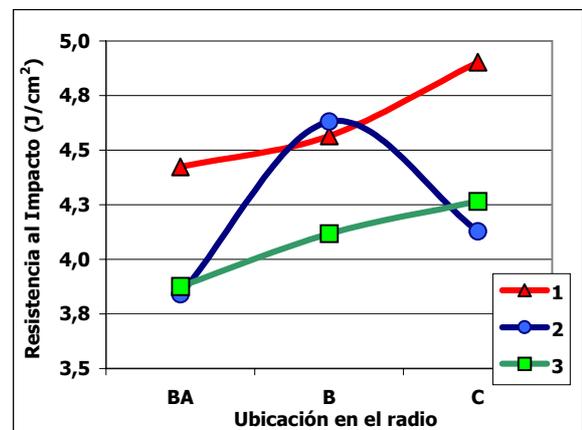


Gráfico N° 34: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio

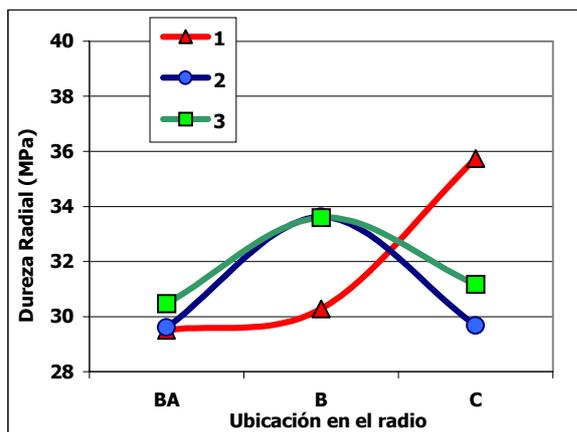


Gráfico N° 35: Dureza radial por altura según ubicación en el radio

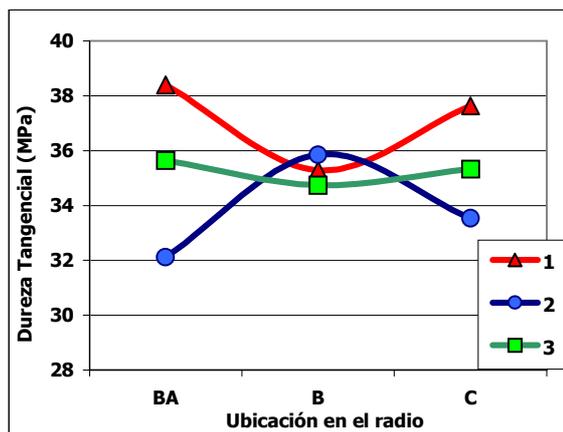


Gráfico N° 36: Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio

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 en la altura para cada una de las ubicaciones en el radio.

El comportamiento del MOE en la altura es similar para todas las ubicaciones, aumenta significativamente de la primer a la tercer troza y no existen diferencias en los valores promedio, salvo en la ubicación "C" que en la primer y segunda troza el valor es muy similar. (Ver gráfico N° 37)

En el MOR se da que en la primer troza no existen diferencias entre las tres ubicaciones radiales, en la ubicación "B" se observa que aumentan los valores con la altura y en las "BA" y "C" descienden en la segunda troza y aumentan en la tercera promediando valores similares a la primer troza. (Ver gráfica N° 38)

La densidad se comporta de igual forma que el MOR, con la salvedad de que en la primer troza el valor de la ubicación "C" es mayor. (Ver gráfico N° 39)

En cuanto a la resistencia al impacto las ubicaciones "BA" y "C" tienen el mismo comportamiento, valores superiores en la primer troza levemente inferiores en la segunda y aumentando también levemente en la tercera. Los valores en todas alturas de la ubicación "BA" son los más bajos. La ubicación "B" tiene un comportamiento diferente, similar a "BA" en la primer troza, superior en la segunda e intermedio en la tercera. (Ver gráfico N° 40)

La dureza radial tiene un comportamiento similar en la segunda y tercer troza para "BA" y "C", aumenta levemente hacia la tercera, pero en la primer troza el valor es muy superior en "C". La ubicación "B" se comporta igual que "BA" en la primer troza, aumenta en la segunda y se mantiene en los mismos valores en la tercera. (Ver gráfico N° 41)

La dureza tangencial es similar en las ubicaciones "BA" y "C" en todas las alturas y como en la dureza radial la ubicación "B" tiene un comportamiento diferente, no existen diferencia importantes en las tres alturas, igualándose los valores con las demás ubicaciones en la tercer troza. (ver gráfico N° 42)

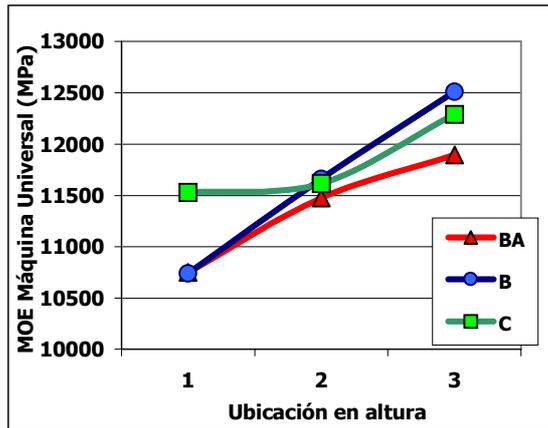


Gráfico N° 37: MOE promedio por ubicación en el radio según altura

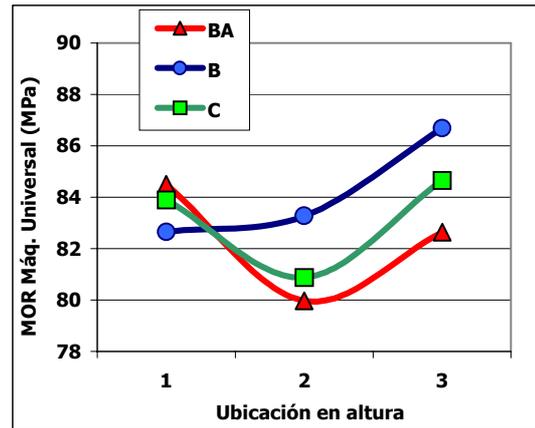


Gráfico N° 38: MOR promedio por ubicación en el radio según altura

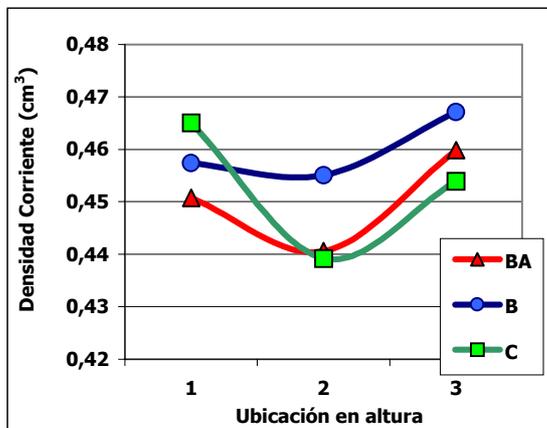


Gráfico N° 39: Dens. Ap. Corr. por ubicación en el radio según altura

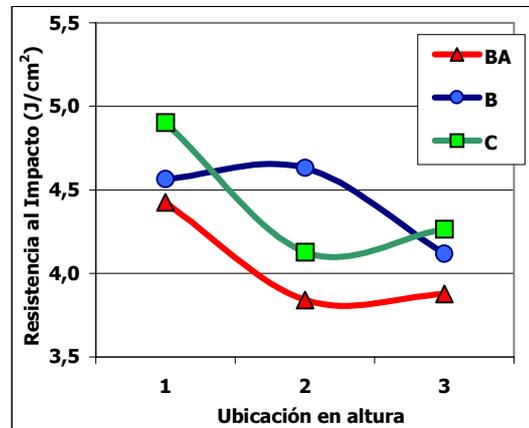


Gráfico N° 40: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

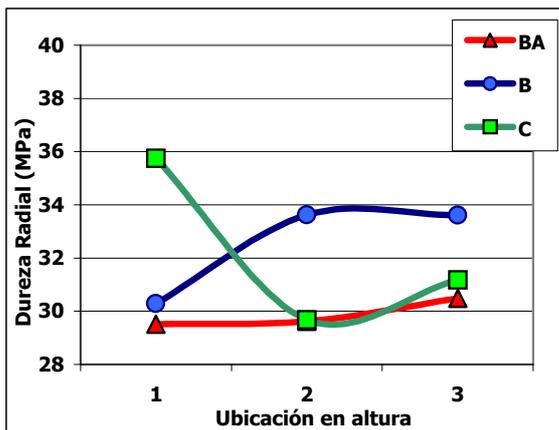


Gráfico N° 41: Dureza radial por ubicación en el radio según altura

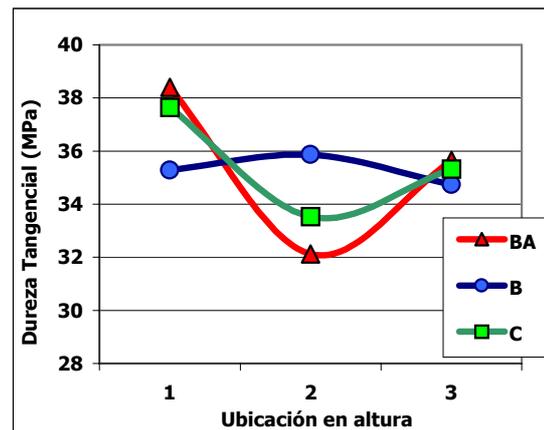


Gráfico N° 42: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura

6.3.6 Relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas

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

En las gráficas N° 43 y 44 vemos que existe cierta relación entre el MOE con el MOR ($r = 0,706$) y con la densidad corriente ($r = 0,611$). En el primer caso recordemos que son pequeñas probetas libres de defectos y que es razonable que exista esta relación. En cuanto a la densidad aparente corriente vemos que es un poco más baja pero tiene menor dispersión de los valores puntuales.

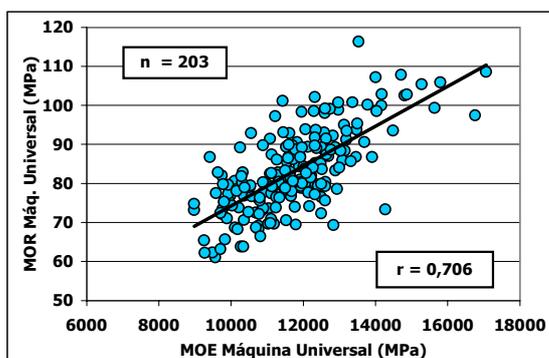


Gráfico N° 43: Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear

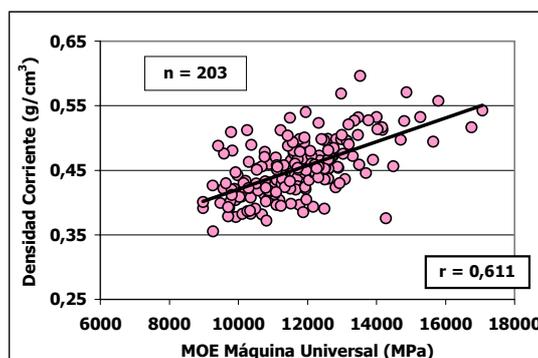


Gráfico N° 44: Relación entre la Dens. Ap. Corr. y el MOE en probetas clear

Para la densidad corriente y el MOR vemos algo similar a lo ocurrido con el MOE donde existe cierta correlación y también una baja dispersión de los valores puntuales. La dureza tangencial y el MOR también tienen cierta correlación pero más baja y también tienen mayor dispersión en los valores puntuales, esto último podría ser debido a que la determinación de la dureza se realiza en un punto determinado, no contemplando la totalidad de la madera de la probeta, en la cual existen variaciones. En cuanto a la densidad corriente es diferente porque evaluamos una sección entera de la probeta previamente ensayada.

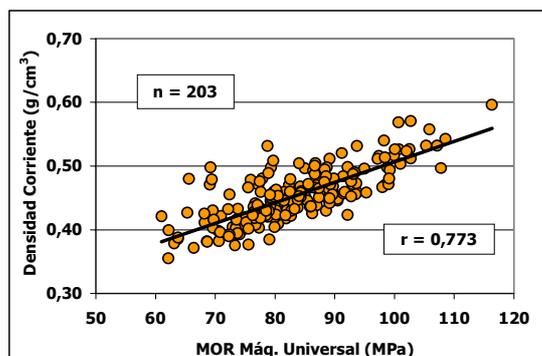


Gráfico N° 45: Relación entre la Densidad Corriente y el MOR en probetas clear

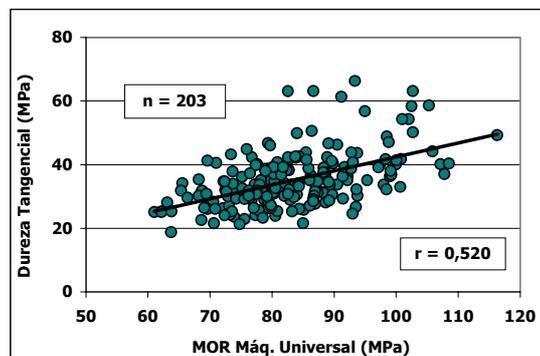


Gráfico N° 46: Relación entre la Dureza Tangencial y el MOR en probetas clear

Existe una mediana relación entre las durezas tangenciales y radiales entre sí y también con la densidad corriente, aunque sería de esperar que ésta fuese mayor ya que en general la densidad está muy relacionada con la dureza, también se observa en éste, al igual que en otros trabajos, que los valores de la dureza tangencial son siempre mayores que los de la dureza radial. (Gráficos N° 47, 48 y 49).

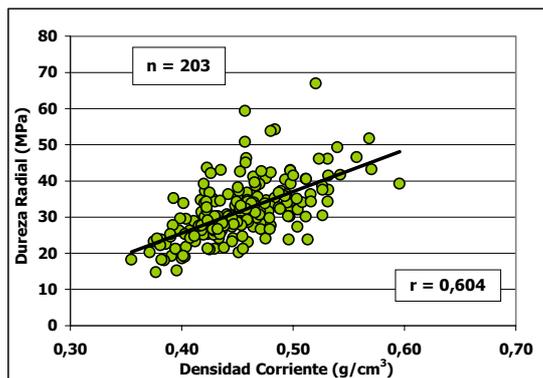


Gráfico N° 47: Relación entre la Dureza Radial y la Dens. Ap. Corr. en probetas clear

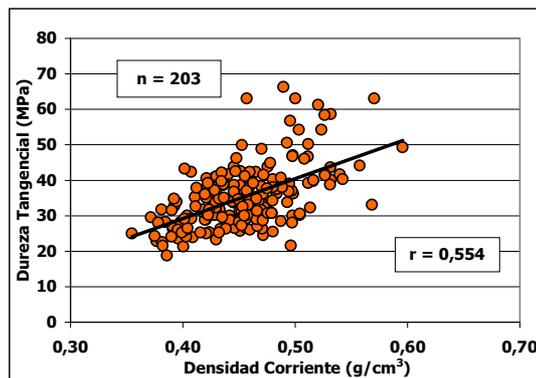


Gráfico N° 48: Relación entre la Dureza Tangencial y la Dens. Ap. Corr. en probetas clear

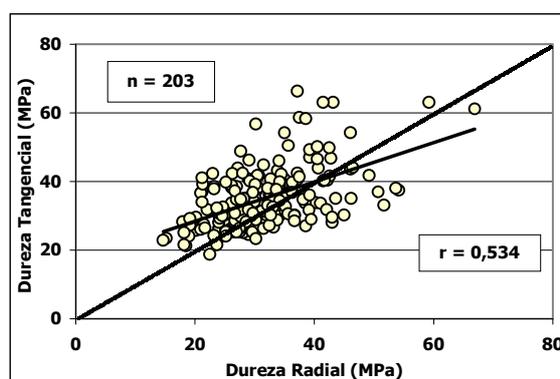


Gráfico N° 49: Relación entre la Dureza Tangencial y la Radial en probetas clear

Como hemos visto en las gráficas anteriores y en el cuadro N° 23 no todas las propiedades tienen cierta correlación entre sí. Las propiedades que sí la tienen son el MOE y el MOR, el MOE y el MOR con la densidad corriente, el MOR con la dureza tangencial, las durezas entre sí y éstas con la densidad corriente.

Cuadro N° 23: Relaciones entre las distintas propiedades

N = 203	MOE	MOR	Resistencia al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Dens. Ap. Corr.
MOE	1	0,706	0,188	0,365	0,340	0,611
MOR		1	0,378	0,466	0,520	0,773
Resistencia al Impacto			1	0,254	0,287	0,308
Dureza Radial				1	0,534	0,604
Dureza Tangencial					1	0,558
Dens. Ap. Corr.						1

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

Se analizó la relación entre probetas clear y las tablas para todas las ubicaciones "BA", "B" y "C", recordemos que se eliminó en el aserrado la médula y por consiguiente su influencia en los valores de resistencia.

Cuadro N° 24: Relación entre las propiedades mecánicas de tablas y las pequeñas probetas libres de defectos "BA", "B" y "C"

	Probetas libres de defectos		Tablas	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	203	203	203	203
Media	11766	83,2	11607	50,6
Máximo	17069	116,3	18484	76,2
Mínimo	8978	61,0	7076	17,7
Desvío std	1414	10,2	1664	13,9
CV (%)	12,0	12,3	14,3	27,5

La correlación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear fue de $r = 0,487$, la que podemos considerar de mediana a baja (Ver gráfica N° 50). Si tenemos en cuenta esto podemos decir que el MOE en este caso es una propiedad que es influida por las características de la madera. Sin embargo el valor medio del MOE tablas fue de 11607 MPa y el de probetas clear 11760 MPa este último es solamente un 1,3 % superior.

Mostramos también en el gráfico un valor (punto oscuro) que ya fue mencionado en el numeral 6.2.1, pertenece a la tabla N° 172 de la primera troza, ubicación radial "BA", con un valor de MOR de 19,5 MPa uno de los más bajos y con un valor de MOE de 7076 MPa el valor más bajo de este ensayo. Fue incluido para mostrar la variabilidad que existe en la madera y además fue un valor obtenido.

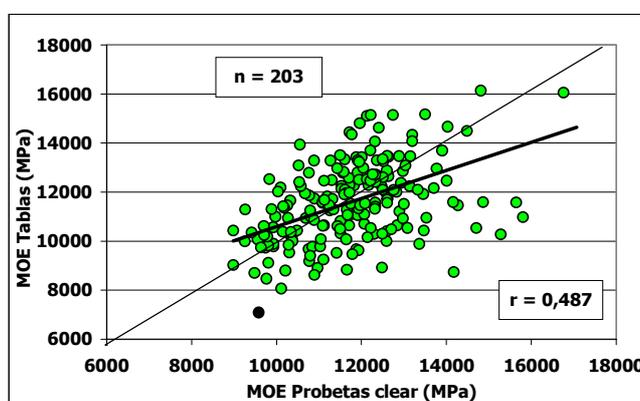


Gráfico N° 50: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

Para el MOR no se observó correlación entre los valores encontrados en tablas y en los valores de las pequeñas probetas obtenidas de éstas (gráfico N° 51, $r = 0,162$). 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 50,6 MPa y para probetas clear fue de 83,2 MPa, vemos que existe una gran diferencia entre ambos valores, un 39,2 % superior al valor de las probetas clear.

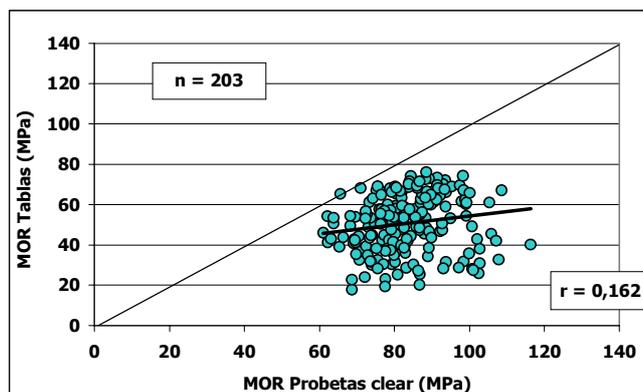


Gráfico N° 51: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas

En las gráficas presentadas a continuación Nros. 52 y 53 vemos la relación entre el MOR y el MOE de las tablas 2"x 6" ($r = 0,457$) y la relación entre el MOR y el MOE de las probetas clear ($r = 0,706$) esta última la hemos mostrado en el numeral anterior, pero a modo de comparación la incluimos ahora. Comparando estas dos gráficas observamos además que las probetas clear tienen una mejor correlación entre sí (sin la influencia de los defectos), vemos la diferencia en la dispersión y en qué zona se agrupan los valores de las dos propiedades.

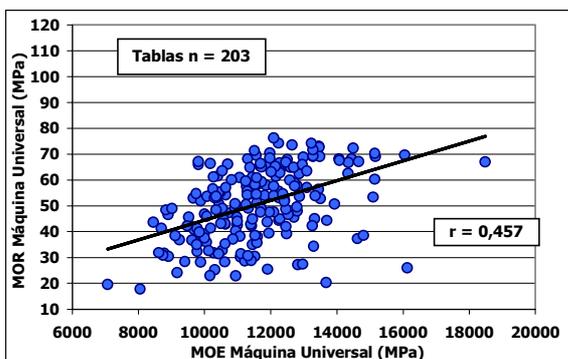


Gráfico N° 52: Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2"x 6"

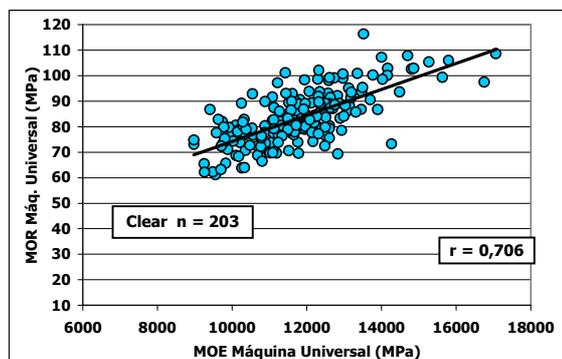


Gráfico N° 53: Relación entre el MOR y el MOE en probetas clear

6.3.8 Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas de tamaño real y pequeñas probetas libres de defectos

Analizaremos en este capítulo los coeficientes de variación de las distintas propiedades físicas y mecánicas de los ensayos realizados en trozas, tablas de tamaño real y en pequeñas probetas libres de defectos y los valores promedio de estos coeficientes para cada una de las propiedades ensayadas (Cuadros Nros. 25, 26 y 27)

Cuadro N° 25: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	No destructivo	7,9
Contenido de Humedad	Destructivo	25,0
Densidad Aparente Básica	Destructivo	8,9

El alto porcentaje del coeficiente de variación que observamos en el contenido de humedad nos muestra la gran variación que existe dentro y entre árboles.

Cuadro N° 26: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,3 % CH. promedio

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	No destructivo	11,8
Módulo de Elasticidad	Destructivo	14,3
Módulo de Rotura	Destructivo	27,5
Contenido de Humedad	Destructivo	8,1
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	8,0

El alto porcentaje del coeficiente de variación que observamos en módulo de rotura nos muestra la gran influencia que ejerce en esta propiedad la presencia de nudos, grietas y otros defectos en las tablas de tamaño real.

Cuadro N° 27: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	Destructivo	12,0
Módulo de Rotura	Destructivo	12,3
Resistencia al Impacto	Destructivo	34,3
Dureza Radial	Destructivo	25,4
Dureza Tangencial	Destructivo	24,6
Dureza Transversal	Destructivo	12,6
Contenido de Humedad	Destructivo	3,1
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	9,4

En el cuadro anterior también podemos ver la influencia positiva que tiene en el módulo de rotura de las probetas clear la no presencia de defectos, ya que el porcentaje del coeficiente de variación es sensiblemente inferior al de las tablas de tamaño real. No ocurre lo mismo en el caso del módulo de elasticidad ya que se ve menos afectado por la presencia de defectos. Los altos coeficientes de variación de las propiedades tales como las durezas radiales y tangenciales y la resistencia al impacto, dependen mucho de la propia variación de la madera. Vimos anteriormente que el contenido de humedad tiene una gran variación en las trozas, esta variación disminuye sensiblemente tanto en las tablas de tamaño real (secas en horno) como en las pequeñas probetas (acondicionadas en cámara climatizada).

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 and 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 elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay, Informe N° 1, Octubre 2002.
8. OLASO MARI, E.; Tesis para título de Ingeniero Agrónomo, sobre "Estudio de la variación en las Propiedades Físicas y Mecánicas de E. Grandis (HILL) ex Maiden del Uruguay" 2002.
9. PÉREZ DEL CASTILLO, A.; VENTURINO CAMAROTA, A.; "Resumen de Propiedades Mecánicas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* de Distintas Zonas del Uruguay" Informe de investigación N° 14, LATU-JICA, Setiembre 2003.
10. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"/ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral de Uruguay, Informe N° 2, Junio 2003.
11. Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"/ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Norte de Uruguay, Informe N° 3, Junio 2004.

FICHA TÉCNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Especie : *Eucalyptus grandis* H

Ensayos realizados en 30 árboles de 12 años de edad

Localidad de origen: Batoví Dorado, Rivera

Propiedades Físicas

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Aparente Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm ³	0,432
Densidad Aparente Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm ³	0,459

Propiedades Mecánicas

No destructiva en trozas verdes sin corteza de 4 m de longitud (valores promedio de 1^{ras}, 2^{das} y 3^{ras} trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	11861	Kgf/cm ²	120949

En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 11,3%

(203 Tablas BA, B y C de las 1^{ras}, 2^{das} y 3^{ras} trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	13302	Kgf/cm ²	135643
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	11607	Kgf/cm ²	118359
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	50,6	Kgf/cm ²	516

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	11766	Kgf/cm ²	119980
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	83,2	Kgf/cm ²	848
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm ²	4,30	Kgf.m/cm ²	0,44
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	31,7	Kgf	323
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	35,1	Kgf	358
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	52,5	Kgf	535

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

Sólo 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 trozas _____	2
Nº 2: Orden en la realización de los trabajos _____	3
Nº 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	4
Nº 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie ___	5
Nº 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer _____	6
Nº 6: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones BA-B-C en las trozas	7
Nº 7: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6") _____	7
Nº 8: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	8
Nº 9: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	9
Nº 10: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal _____	11
Nº 11: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	12
Nº 12: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	12
Nº 13 y 14: Tipo de rotura por compresión y tensión _____	20

Cuadros	Página
Nº 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	2
Nº 2: Datos técnicos del rodal _____	2
Nº 3: Raleos realizadas _____	3
Nº 4: Grados de clasificación de las trozas _____	3
Nº 5: Porcentaje de trozas según el grado a la que pertenecen _____	13
Nº 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica _____	13
Nº 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio _____	14
Nº 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura _____	15
Nº 9: MOE sin corteza (FFT Analyzer) según troza _____	17
Nº 10: Resumen de las propiedades mecánicas en tablas secas (BA, B y C) _____	19
Nº 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1º y 2º troza _____	19
Nº 12: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio _____	22
Nº 13: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en la altura _____	24
Nº 14: Porcentaje de tablas según categoría JAS _____	27
Nº 15: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	27
Nº 16: Porcentaje de tablas por ubicación en la altura y en el radio aptas para uso estructural según norma JAS _____	28
Nº 17: Resumen de las propiedades mecánicas del MOE y el MOR de pequeñas probetas libres de defectos _____	29
Nº 18: Resumen de las propiedades mecánicas Flexión Dinámica y Dureza Janka de pequeñas probetas libres de defectos _____	29
Nº 19: Propiedades mecánicas MOE y MOR según ubicación en el radio _____	30
Nº 20: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka según ubicación en el radio _	30
Nº 21: Propiedades mecánicas MOE y MOR según su ubicación en altura _____	31
Nº 22: Propiedades mecánicas Resistencia al Impacto y Dureza Janka según su ubicación en la altura _____	31
Nº 23: Relación entre las distintas propiedades _____	37
Nº 24: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de defectos "BA", "B" y "C" _____	38
Nº 25: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde	40
Nº 26: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,3 % CH. promedio _____	40
Nº 27: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio _____	40

Nº 1:	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial	14
Nº 2:	Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio	15
Nº 3:	Densidad Básica por altura según ubicación en el radio	15
Nº 4:	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura	15
Nº 5:	Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura	16
Nº 6:	Densidad Básica por probeta según ubicación en altura	16
Nº 7:	Variación de los valores de MOE entre árboles	16
Nº 8:	Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza según la posición en altura	17
Nº 9:	Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza	18
Nº 10:	Relación entre el MOE y la velocidad de crecimiento (expresada como DAP)	18
Nº 11:	Relación entre el MOE FFT Analyzer y la Densidad Aparente Básica (Condición verde)	18
Nº 12:	Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)	21
Nº 13:	Relación entre el MOR y el MOE	21
Nº 14:	Relación entre la Densidad Ap. Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)	22
Nº 15:	Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio	23
Nº 16:	MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	23
Nº 17:	MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	23
Nº 18:	MOE y MOR según ubicación en altura	24
Nº 19:	MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	25
Nº 20:	MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	25
Nº 21:	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas	25
Nº 22:	Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "BA", "B" y "C"	26
Nº 23:	Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS	28
Nº 24:	Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS	28
Nº 25:	MOE y MOR promedio según ubicación en el radio	30
Nº 26:	Resistencia al Impacto según ubicación en el radio	30
Nº 27:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio	31
Nº 28:	MOE y MOR promedio según ubicación en altura	31
Nº 29:	Resistencia al Impacto según ubicación en altura	32
Nº 30:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura	32
Nº 31:	MOE promedio por altura según ubicación en el radio	33
Nº 32:	MOR promedio por altura según ubicación en el radio	33
Nº 33:	Densidad Aparente Corriente por altura según ubicación en el radio	33
Nº 34:	Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio	33
Nº 35:	Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio	34
Nº 36:	Dureza radial por altura según ubicación en el radio	34
Nº 37:	MOE promedio por ubicación en el radio según altura	35
Nº 38:	MOR promedio por ubicación en el radio según altura	35
Nº 39:	Densidad Aparente Corriente por ubicación en el radio según altura	35
Nº 40:	Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura	35
Nº 41:	Dureza radial por ubicación en el radio según altura	35
Nº 42:	Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura	35
Nº 43:	Relación entre el MOE y el MOR en probetas clear	36
Nº 44:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOE en probetas clear	36
Nº 45:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el MOR en probetas clear	36
Nº 46:	Relación entre la Dureza Tangencial y el MOR en probetas clear	36
Nº 47:	Relación entre la Dureza Radial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear	37
Nº 48:	Relación entre la Dureza Tangencial y la Densidad Aparente Corriente en probetas clear	37
Nº 49:	Relación entre la Dureza Tangencial y la Radial en probetas clear	37
Nº 50:	Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas	38
Nº 51:	Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas	39
Nº 52:	Relación entre el MOR y el MOE en tablas de 2" x 6"	39
Nº 53:	Relación entre el MOR y el MOE en probetas clear	39



Dirección General Forestal



Sociedad de Productores Forestales



Asociación de Industriales de la Madera



LATU Sector Productos Forestales

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

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