

# **PROPIEDADES MECÁNICAS DE** *Pinus taeda* L. **DEL LITORAL DE URUGUAY**



Informe N° 2

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

**Junio 2003**

## Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino

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

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

### Agradecimientos

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



## PROPIEDADES MECANICAS DE *PINUS TAEDA* L. DEL LITORAL DE URUGUAY

	Página
1. <b>INTRODUCCIÓN</b>	5
2. <b>MATERIALES</b>	5
2.1 <u>Muestreo y clases diamétricas de los árboles</u>	5
2.2 <u>Características de los rodales</u>	6
2.2.1 <u>Datos técnicos del rodal</u>	6
2.2.2 <u>Manejos (podas y raleos)</u>	6
3. <b>ENSAYOS EN LAS TROZAS</b>	7
3.1 <u>Clasificación visual de trozas</u>	7
3.2 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica</u>	8
3.3 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	9
3.4 <u>Aserrado de trozas para obtención de las tablas ( 2"X 6")</u>	10
4. <b>ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2" X 6"</b>	11
4.1 <u>Secado de las tablas en horno industrial</u>	11
4.2 <u>Dimensionado de las tablas e inspección visual</u>	12
4.3 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2"x 6" por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer</u>	12
4.4 <u>Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (máquina universal) sobre tablas de 2" x 6"</u>	13
4.5 <u>Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Corriente de tablas ensayadas</u>	14
5. <b>ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS</b>	14
5.1 <u>Determinación de Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)</u>	14
5.2 <u>Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica</u>	15
5.3 <u>Determinación de la Dureza JANKA</u>	16
5.4 <u>Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Corriente</u>	17
6. <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	17
6.1 <u>Estudios realizados sobre trozas en estado verde</u>	17
6.1.1 <u>Clasificación visual</u>	17
6.1.2 <u>Contenido de Humedad y Densidad Básica</u>	17
6.1.3 <u>Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio</u>	18
6.1.3.1 <u>Análisis por altura según ubicación en el radio</u>	19

6.1.4	Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura	20
6.1.4.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	20
6.1.5	Módulo de Elasticidad de las trozas	21
6.2	<b>Estudios realizados en tablas secas (2"x 6")</b>	24
6.2.1	Resumen de las propiedades mecánicas en tablas (solo B y C)	24
6.2.2	Relación entre las distintas propiedades mecánicas	26
6.2.3	Relación entre el tipo de tabla y su posible uso estructural	27
6.2.4	Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas	28
6.2.5	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	28
6.2.5.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	29
6.2.6	Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en altura	30
6.2.6.1	Análisis por ubicación en el radio según altura	31
6.2.7	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de sus tablas	31
6.2.8	Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS	32
6.3	<b>Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos</b>	34
6.3.1	Resumen de las propiedades mecánicas	34
6.3.2	Variación de las propiedades mecánicas según la ubicación en el radio	35
6.3.3	Variación de las propiedades mecánicas en la altura	37
6.3.4	Análisis de las propiedades mecánicas por altura según la ubicación en el radio	39
6.3.5	Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según la altura	40
6.3.6	Relación entre las distintas propiedades	41
6.3.7	Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos	42
7	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	44
	Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Pinus taeda</i> L. del Litoral de Uruguay	45
	Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos	46

## RESUMEN

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

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

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

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

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

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

## SUMMARY

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

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

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

From the same boards, small clear specimens were tested.

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

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

## 1. INTRODUCCIÓN

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

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

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

Le atribuimos gran importancia al conocimiento y a la caracterización de nuestras especies forestales para la obtención de madera de buena calidad. Esta segunda publicación pretende colaborar en este conocimiento de la especie *Pinus taeda* L. implantada en el Uruguay, que en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 100.000 hectáreas. En este caso analizaremos la madera de un rodal del litoral de nuestro país, más precisamente del departamento de Río Negro.

## 2. MATERIALES

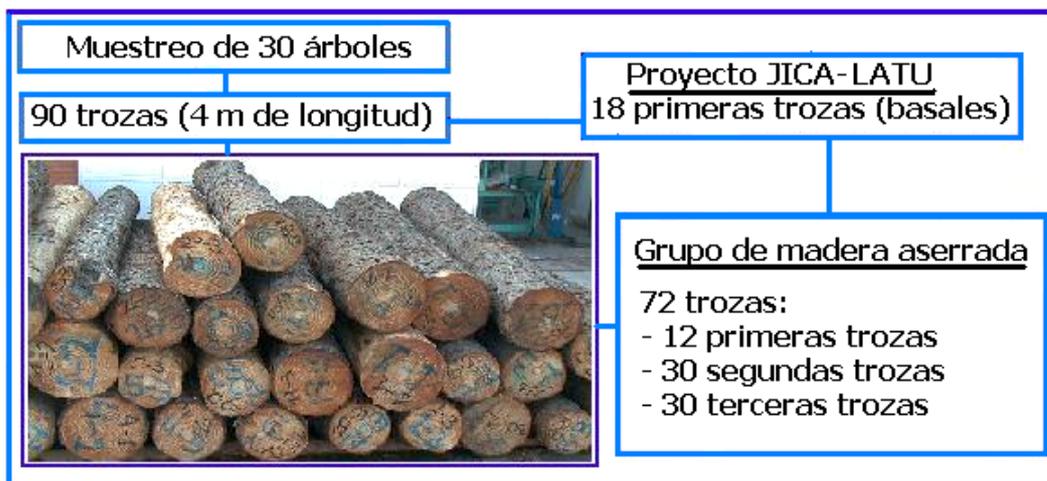
### 2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles

La selección de los árboles se realizó mediante un muestreo selectivo, en un rodal previamente elegido por especie, edad y manejo, dicho muestreo se realizó en setiembre del 2001.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 30 árboles divididos en tres clases diamétricas (9, 12 y 9 por clase). La selección de los árboles se realizó por diámetro, poca conicidad, rectitud del fuste y hábito de ramas.

A cada árbol se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura de la primera rama viva, altura total y altura comercial (15 cm de diámetro).

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



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

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

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

Clases diamétricas		Número de Individuos	DAP c/c Medio (cm)	Altura (m)		
Clase	Rango (cm)			Total	Ø = 15 cm	1° rama viva
1	< 35	9	34,6	24,0	17,9	13,4
2	36-40	12	37,6	23,6	17,6	11,4
3	> 41	9	44,3	24,0	18,8	12,5

## 2.2 Características de los rodales muestreados

### 2.2.1 Datos técnicos del rodal

**Cuadro N° 2: Datos técnicos del rodal.**

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

### 2.2.2 Manejos (podas y raleos)

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

**Cuadro N° 3: Podas realizadas.**

Podas			
Número	Edad (años)	Altura (m)	N° de árboles
1	8	2,4	Todos
2	10	5,5	450

**Cuadro N° 4: Raleos realizados.**

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

### **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, cantidad y disposición de los nudos.

Los distintos grados se muestran a continuación:

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

- Grado I:	<b>Troza derecha, sin nudos ni otros defectos, baja conicidad.</b>
- Grado II:	<b>Troza levemente torcida, con nudos pequeños (poca cantidad) o internudos cortos y conicidad media.</b>
- Grado III:	<b>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.</b>
- Grado IV:	<b>Troza con severos defectos, muy mala.</b>

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

Una vez finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas, dejándolas de 3 m de longitud. Del metro 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 esta como referencia para medir la distancia del centro de las probetas a la médula.

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

La razón de tomar tres probetas bien definidas en el radio es la de permitir estudiar la variación del Contenido de Humedad y la Densidad Básica desde la médula hasta 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 alrededor de la médula y que se distribuye en el radio hasta cierto anillo de crecimiento (esto varía dependiendo de la especie) y que se localiza a lo largo de todo el fuste. Madera adulta es aquella que se forma a partir de la zona de transición hacia el cambium y la corteza. Para determinar esta zona de transición se utilizan indicadores de la calidad de la madera como longitud de fibras o traqueidas, la densidad básica, etc. Debemos mencionar también que no es lo mismo duramen que madera juvenil, en la figura N° 4 vemos las distintas proporciones de madera juvenil, madera adulta, duramen y de albura en pinos de plantaciones.

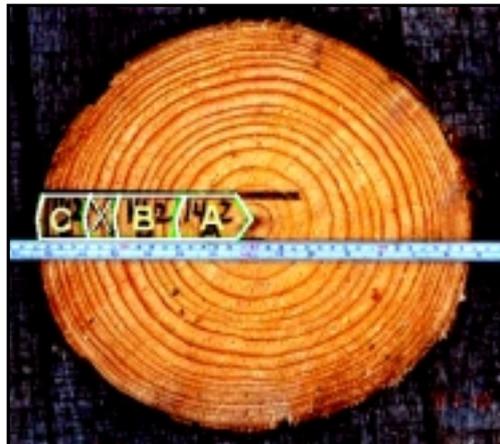


Figura N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas.

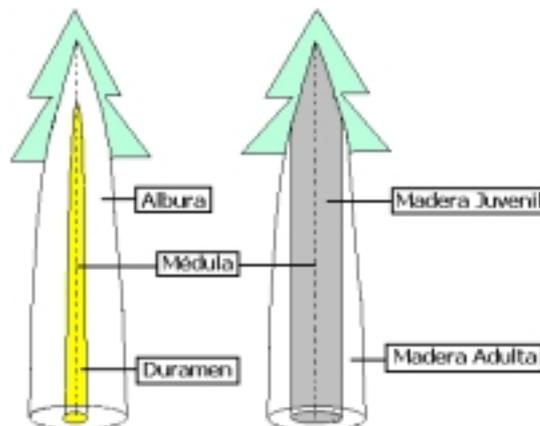


Figura N° 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie

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

Las probetas posteriormente fueron secadas en una estufa a  $103 \pm 2^\circ \text{C}$ . hasta llegar a estado anhidro (peso anhidro).

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

Las fórmulas para los cálculos fueron las siguientes:

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

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

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

<b><math>D_{\text{basica}}</math></b>	: Densidad aparente básica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
<b><math>V_V</math></b>	: Volumen verde
<b><math>P_{\text{Anh}}</math></b>	: Peso anhidro
<b><math>P_{\text{sat}}</math></b>	: Peso húmedo
<b><math>P_{\text{sum}}</math></b>	: Peso sumergido
<b><math>P_V</math></b>	: Peso verde
<b><math>CH</math></b>	: Contenido de Humedad (%)

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

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) mediante el ensayo no destructivo basado en el método de la principal frecuencia de vibración longitudinal, con equipo FFT Analyzer (Primera Transformada de Fourier). Este es un equipo que analiza el sonido producido por el impacto de un martillo, que luego de atravesar la probeta es captado en el otro extremo mediante un micrófono. De este sonido se analiza la principal frecuencia de vibración con la cual se calcula el MOE. Las trozas en estado verde (3 m de longitud) fueron pesadas, medidas en la longitud, el diámetro mayor y el diámetro menor) para poder obtener el volumen y con el peso determinar la densidad.

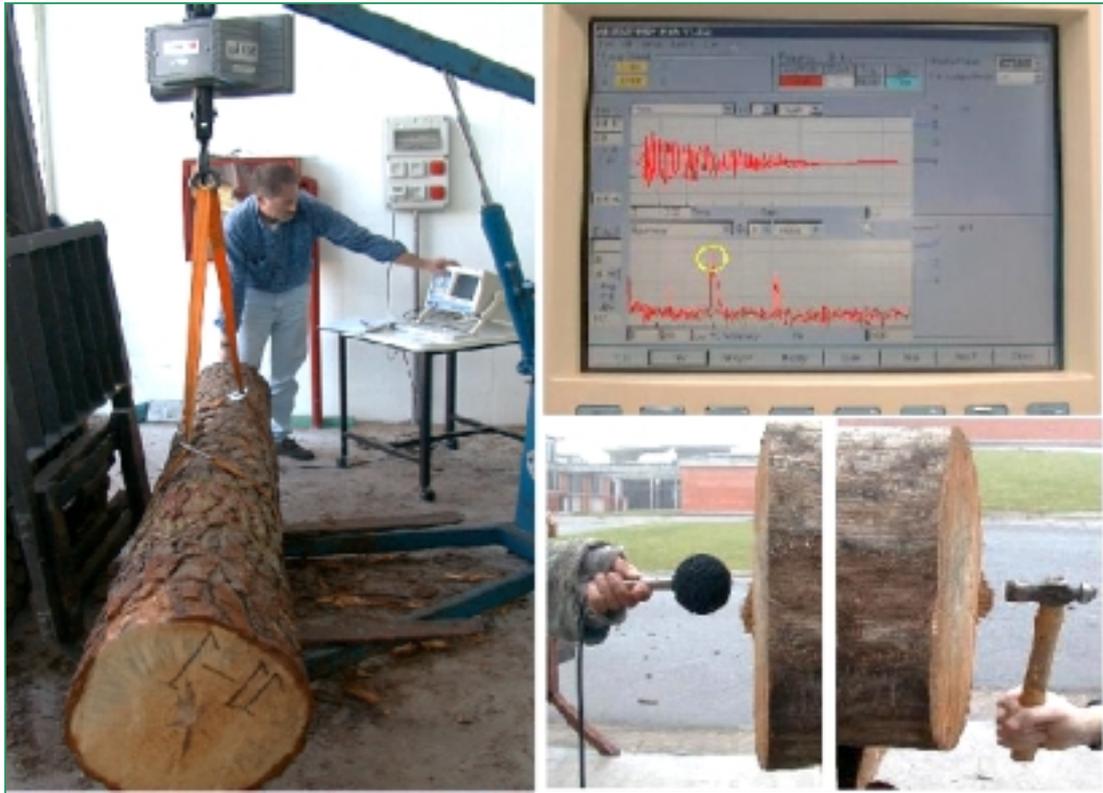
A partir de la frecuencia obtenida se calcula el Módulo de elasticidad mediante la siguiente fórmula:

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

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

<b><math>E_{ft}</math></b>	: MOE por vibración longitudinal
<b><math>L</math></b>	: Longitud de la troza
<b><math>fl</math></b>	: Frecuencia de vibración longitudinal
<b><math>g</math></b>	: Constante de aceleración gravitacional
<b><math>n</math></b>	: $n^\circ$ de nodo = 1
<b><math>\rho</math></b>	: Densidad de la madera (troza)

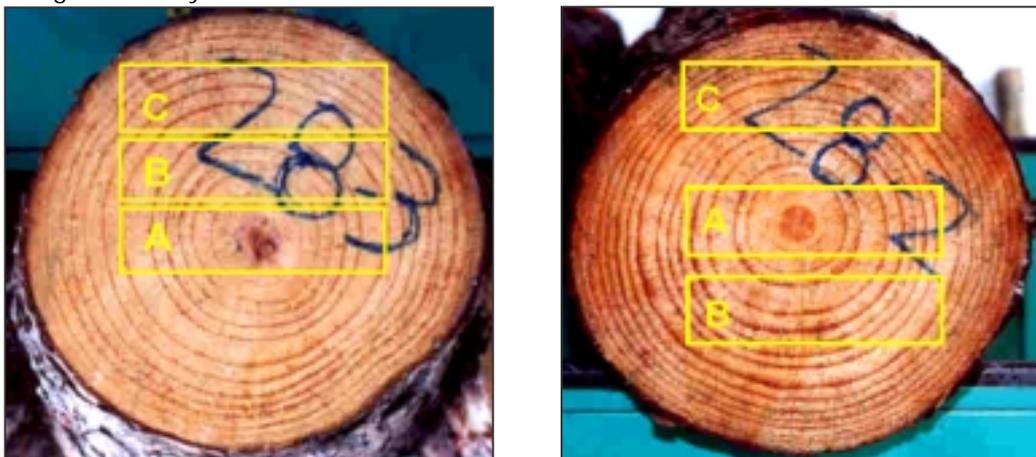
Finalizado el ensayo de las trozas, se procedió a descortezar y ensayar nuevamente a alguna de ellas, de forma de estimar los valores del MOE sin corteza y poder correlacionarlos con los valores de MOE con corteza.



**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: "A" la que incluían médula o parte de ella y por consiguiente madera juvenil, "B" tablas cercanas a la médula (intermedias) con diferentes porcentajes de madera adulta y juvenil y "C" tablas próximas a la corteza con una mayor proporción de madera adulta. Ver las siguientes figuras N° 6 y 7.



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



**Figuras N° 8 y 9: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6")**

#### **4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 2"x 6"**

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

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

**Figura N° 10: Continuación de los ensayos en tablas de 2"x 6".**

##### **4.1 Secado de las tablas en horno industrial**

El secado de las tablas se realizó en su totalidad en hornos industriales. El contenido de humedad final promedio de las tablas fue de 9,3 %. 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 estas son ajustadas a su longitud final de ensayo 2,80m.

#### **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 escuadrias de 2800 mm x 150 mm x 50 mm.

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

#### **4.3 Determinación 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:

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

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



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

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

Los ensayos mecánicos destructivos para determinar el MOE y el MOR fueron realizados en la Máquina universal Minebea de 250 kN de capacidad. Las tablas fueron sometidas a un esfuerzo de flexión estática de 4 puntos, con una separación entre apoyos inferiores (span) de 2520 mm y que recibieron un esfuerzo en 2 puntos separados 840 mm entre sí. (Ver figura N° 12)

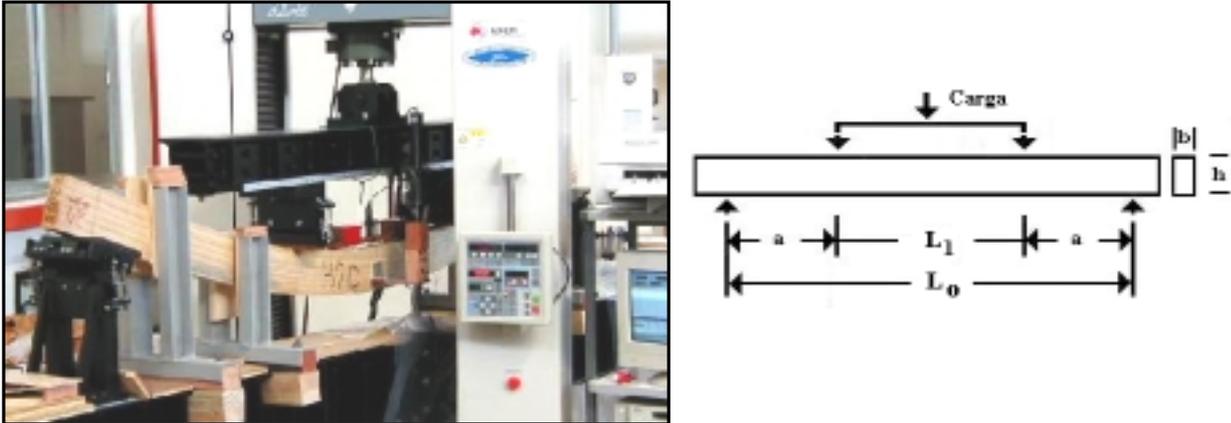


Figura N° 12. Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

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

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

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

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

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

**ΔP** : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.  
**L<sub>0</sub>** : Distancia entre apoyos inferiores (span)  
**L<sub>1</sub>** : Distancia entre apoyos superiores de carga  
**I** : Momento de Inercia  
**Δy** : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

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

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

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

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

De las partes sobrantes del ensayo mecánico de flexión estática (2800 x 150 x 50 mm) se confeccionaron probetas 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 corriente se utilizó la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials D 2395, Method A.

Las formulas utilizadas fueron las siguientes:

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

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

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

Nota: La densidad corriente se define como el cociente entre el peso anhidro y el volumen a 12% CH. En este trabajo se estimó la densidad corriente a partir del volumen a 9,3 % CH para las tablas y a 10,6% CH 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 %.

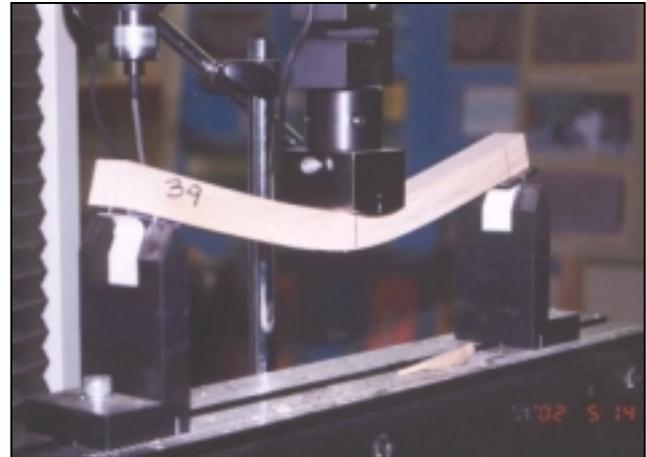
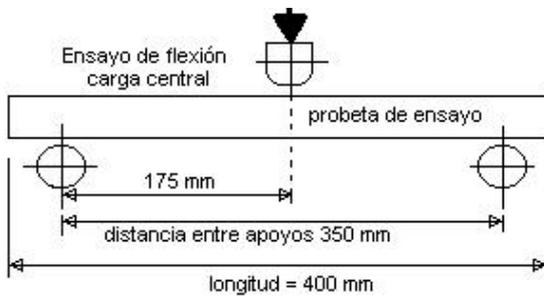
Se realizaron los tres ensayos en pequeños especímenes que se consideraron de mayor relevancia:

- 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 400 x 25 x 25 mm, en la Máquina universal Minebea, utilizando una celda de carga de 50 kN de capacidad, con una distancia de apoyos inferiores (span) de 350 mm, ejerciendo la carga en la cara radial y en el centro de la probeta. (Ver figura N° 13)

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



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

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

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

**$\Delta P$**  : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional  
 **$l$**  : Distancia entre apoyos inferiores (span)  
 **$I$**  : Momento de Inercia  
 **$b$**  : Ancho de la probeta  
 **$h$**  : Altura de la probeta  
 **$\Delta y$**  : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

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

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

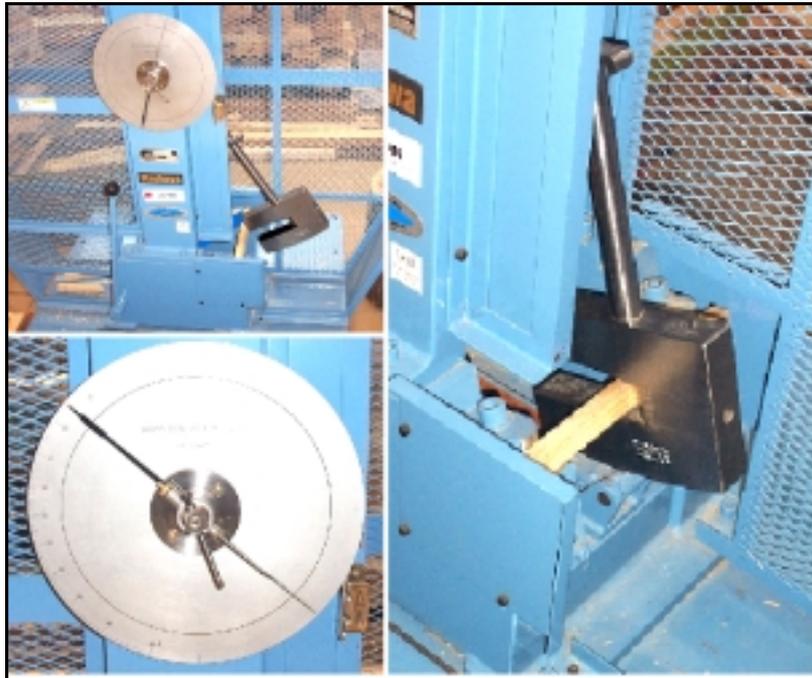
## 5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica

El ensayo de flexión dinámica se realizó sobre probetas de 300 x 20 x 20 mm en péndulo Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se produjo en el centro de la probeta, 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/cm<sup>2</sup>)  
 **$E$**  : Energía absorbida ( J )  
 **$b$**  : Ancho de la probeta (cm)  
 **$h$**  : Altura de la probeta (cm)



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

### **5.3 Determinación de la Dureza JANKA**

El ensayo de resistencia a la dureza se realizó sobre probetas de 150 x 45 x 45 mm en máquina universal Minebea con una celda 50 kN de capacidad, sobre las caras radiales, tangenciales y transversales. La determinación de la dureza se realiza por medio de la penetración en la madera de las probetas de una media esfera ( $\varnothing = 11.3$  mm) a una velocidad de 6 mm/mín.

Se utilizó para este ensayo la norma ASTM "American Society for Testing and Materials" D 143 Hardness.

La dureza se expresa como el valor de la carga requerido para la penetración del accesorio en la probeta. (Ver Figura N° 15)



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

#### 5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Corriente

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

### 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 6.1 Estudios realizados sobre trozas en estado verde

##### 6.1.1 Clasificación visual

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

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

	CATEGORÍA		
	I	II	III
Troza 1	0,90	0,10	0,00
Troza 2	0,37	0,63	0,00
Troza 3	0,00	0,20	0,80

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

##### 6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Básica

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 148%, encontrándose variaciones importantes entre individuos y también para una misma ubicación en radio y altura.

Esta variación está dada por características de la madera como la proporción leño temprano y leño tardío, presencia de extractivos, edad de la madera, por los procesos de duraminización y por la variabilidad entre individuos.

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

La densidad básica promedio fue de 0,38 g/cm<sup>3</sup> encontrándose también variaciones importantes entre árboles y dentro del mismo árbol, en el radio y en la altura del fuste.

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

	Contenido de Humedad (%)	Densidad Básica (g/cm <sup>3</sup> )
Número	216	216
<b>Promedio</b>	<b>148</b>	<b>0,384</b>
Máximo	224	0,533
Mínimo	44	0,315
STD	32	0,046
CV %	22	12,0

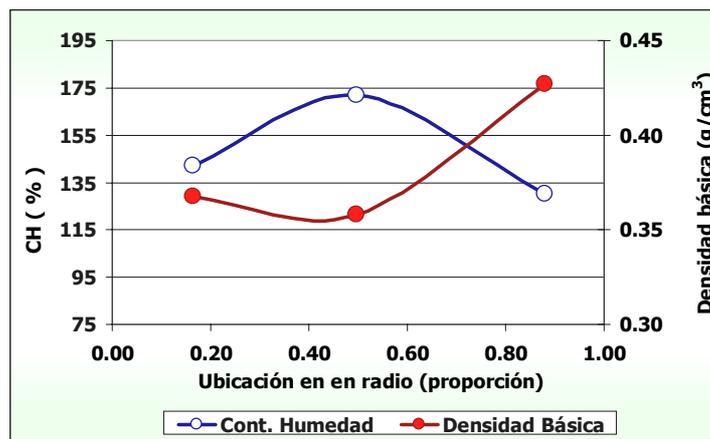
### 6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio

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

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

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

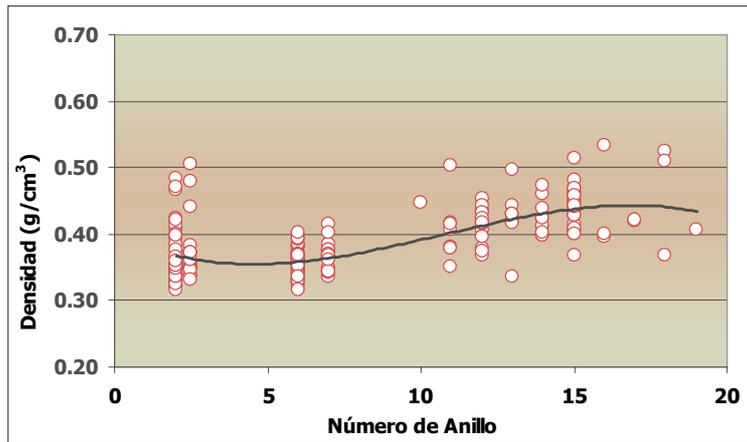
Probeta	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
A	72	142	35,0	24,6	0,367	0,041	11,8
B	72	172	20,0	11,7	0,358	0,021	5,9
C	72	130	23,0	14,4	0,427	0,039	9,2
<b>Promedio</b>		<b>148</b>		<b>21,6</b>	<b>0,384</b>		<b>12,0</b>



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

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

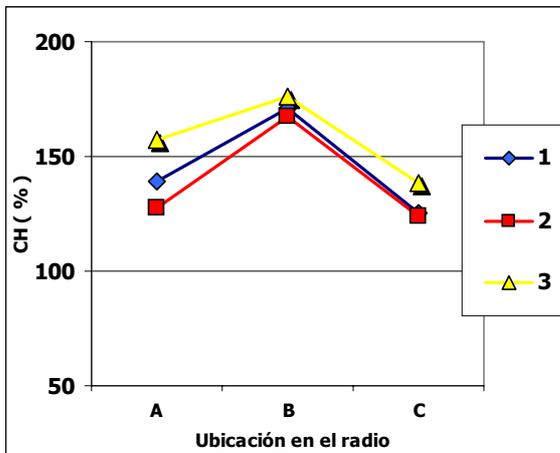
La densidad aumentaría con la edad cambial (del cambium) de la madera alcanzando un valor máximo en el que se mantendría constante. Esto se pudo ver cuando se analizó la densidad en función del anillo representativo de cada probeta. En el largo plazo esperaríamos que la madera producida en la segunda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



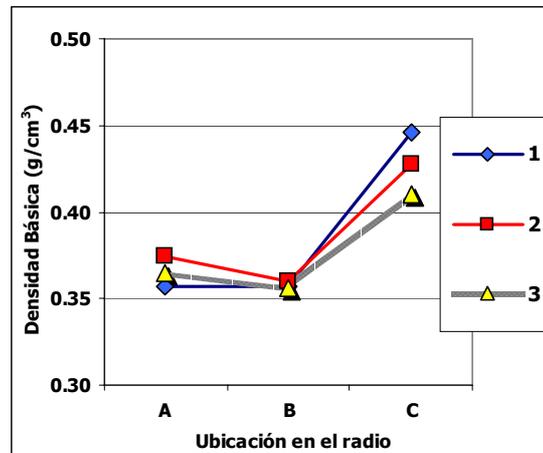
**Gráfico N°2: Densidad Básica según anillo medio de la probeta**

**6.1.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio**

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



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



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

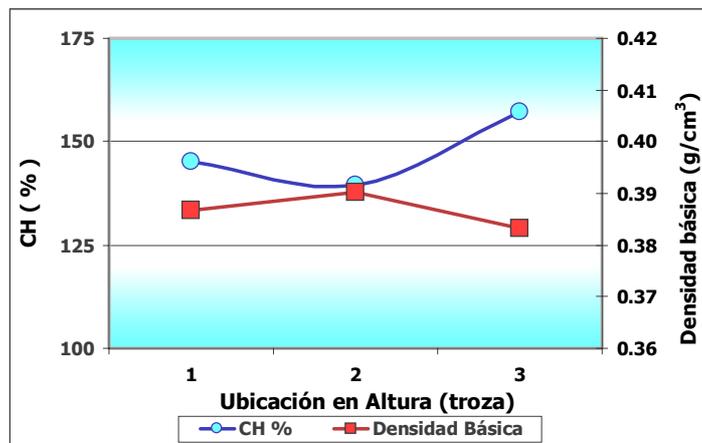
#### 6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura

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

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

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Básica (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
<b>1</b>	36	145	31	22	0,387	0,055	14,2
<b>2</b>	90	139	32	23	0,390	0,047	12,1
<b>3</b>	90	157	30	19	0,383	0,046	12,0
<b>Promedio</b>		<b>148</b>		<b>21</b>	<b>0,385</b>		<b>12,8</b>

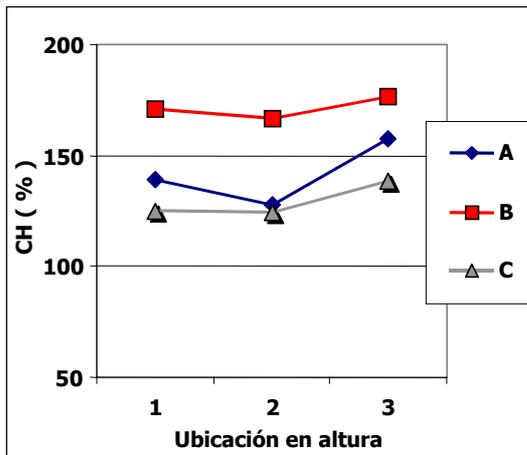
En la primer troza existe cierta duraminización de la madera y una menor proporción de madera juvenil que en el resto de las trozas. Estas dos características hacen que el contenido de humedad se mantenga bajo y la menor proporción de madera juvenil hace que la densidad sea mayor que en las otras trozas.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



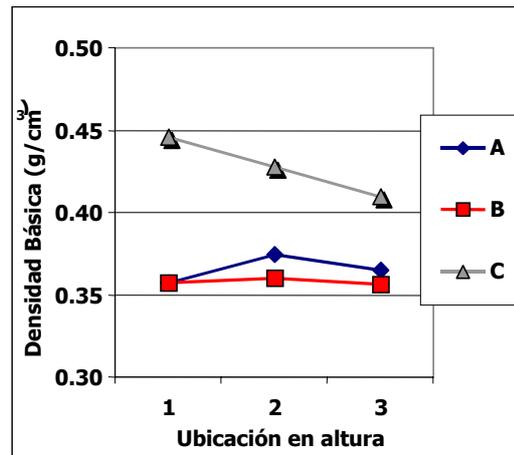
**Gráfico N° 5: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura**

##### 6.1.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura

Para ambas propiedades, el análisis por altura para cada una de las probetas (A, B y C) mostró que la tendencia de la variación en altura es igual para todas las ubicaciones en el radio, variando solo el valor absoluto de la propiedad para cada caso. Los valores de densidad en las probetas "A" está dado por su alto contenido de resina, por esta razón son similares en su comportamiento a las probetas "B".



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

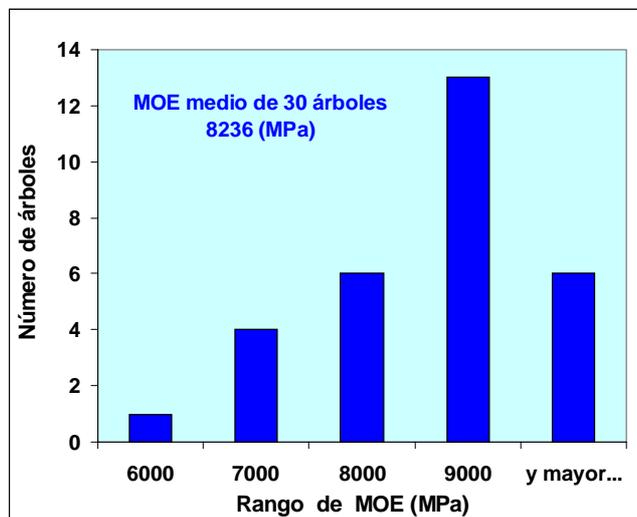


**Gráfico N°7: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura**

### 6.1.5. Módulo de Elasticidad de las trozas

El MOE promedio de las trozas analizadas (30 de cada altura) es de 8236 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, tomando como valor del árbol el promedio de los valores de las tres trozas (primera, segunda y tercer troza). Ver gráfico N° 8.



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

Existió un patrón de variación para las trozas dentro de un mismo árbol. El valor más alto se encuentra en la segunda troza siendo menores en la primera y tercera troza. Pensamos que se debe, para la troza basal, a la influencia de la madera producida en los primeros años y a la presencia de madera de características diferentes en la base del árbol (los primeros 50 o 70 cm, según TRENDELENBURG, R.,(1939) Das Holz als Rohstoff, p.p. 295 1 st ed, Munchen, J. F. LEHMEN VERLAG), y en el caso de la tercer troza, a la mayor proporción de madera juvenil.

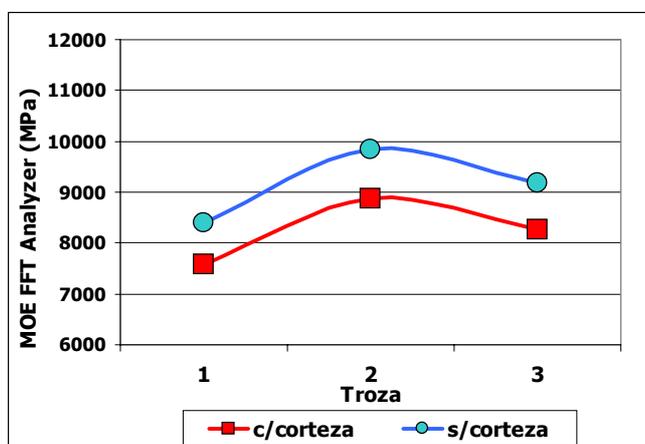
**Cuadro N° 10: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza**

Árbol N°	MOE Trozas con corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
<b>Media</b>	<b>7568</b>	<b>8864</b>	<b>8275</b>	<b>8236</b>
<b>Máximo.</b>	10268	11116	11014	10494
<b>Mínimo.</b>	3900	6535	6287	5744
<b>Desv std.</b>	1693	1121	1095	1148
<b>CV (%)</b>	22,4	12,6	13,2	16,1

Además de que la segunda troza presenta el valor de MOE más alto, es la que tiene un comportamiento más homogéneo. Esto nos llevaría a pensar que el promedio de las tablas de la segunda troza sería también más alto que el promedio de las tablas de la primera y tercera troza. Presunción que confirmaremos mas adelante.

En el siguiente gráfico N° 9, se muestra el MOE de las trozas en tres alturas, con corteza y sin corteza. Al igual que observamos en el estudio anterior (Propiedades Mecánicas de *Pinus Elliottii* Eng. del Litoral del Uruguay, Grupo Técnico de Madera Aserrada, Informe N° 1, Octubre 2002) la correlación entre el MOE obtenido de las trozas con corteza y una vez descortezadas fue alta (ver gráfico N° 10,  $r = 0,937$ ) y se constató también una diferencia entre ambos valores de aproximadamente un 10%. Estos valores altos de correlación entre las dos determinaciones es un resultado 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. Mas adelante veremos que la relación entre el MOE de las trozas y el de las tablas obtenidas de estas es alta, hecho que nos permite validar este método no destructivo para determinar el MOE.

Los resultados obtenidos son el producto de los ensayos en todas las trozas con corteza y del descortezado de 30 trozas (20 primeras trozas, 5 segundas trozas y 5 terceras trozas).

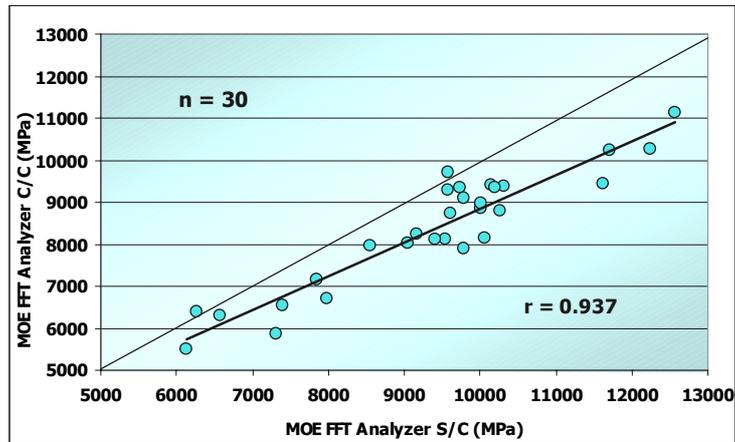


**Gráfico N° 9: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con y sin corteza según la posición en altura**

En el siguiente cuadro N° 11. vemos los valores del MOE de las trozas con corteza y sin corteza obtenidos mediante el FFT Analyzer, siendo el valor promedio de MOE sin corteza un 9,9 % superior.

**Cuadro N°11: MOE promedio con y sin corteza**

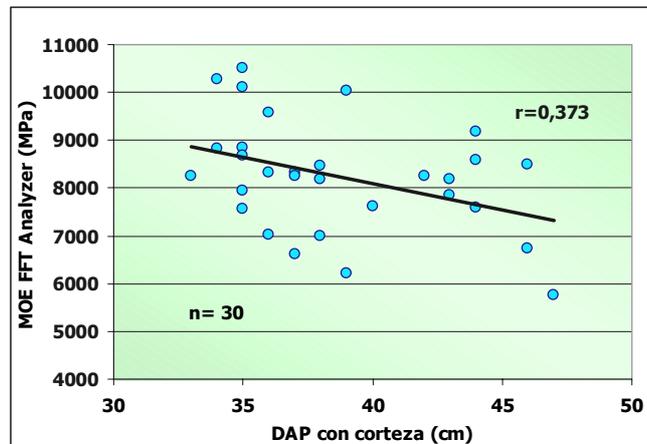
FFT Analyzer	Con Corteza	Sin Corteza
<b>MOE Promedio (MPa)</b>	<b>8236</b>	<b>9142</b>



**Gráfico N° 10: Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza**

No se encontró relación entre el MOE de las trozas y la velocidad de crecimiento expresada como diámetro a altura de pecho (DAP), hecho que permite decir que en este estudio la calidad de la madera no depende de la velocidad de crecimiento ( $r = 0,373$ ) ver gráfico N° 11.

En el estudio realizado en *Pinus elliotii* de Río Negro se observó también que no existe una relación significativa entre el MOE y el DAP ( $r = 0,382$ )



**Gráfico N° 11: Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE**

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

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

Las tablas fueron secadas en horno industrial y posteriormente fueron llevadas a sus dimensiones finales de ensayo. El contenido de humedad promedio de las tablas luego del secado y en condiciones de ensayo fue de 9,3%.

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

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

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

	<b>MOE FFT Analyzer (MPa)</b>	<b>MOE Máq. Universal (MPa)</b>	<b>MOR Máq. Universal (MPa)</b>	<b>Densidad Corriente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Número	140	140	140	140
<b>Promedio</b>	<b>9049</b>	<b>8383</b>	<b>38.1</b>	<b>0,409</b>
Máximo	14663	12978	78,1	0,613
Mínimo	4364	4244	8,0	0,343
STD	1864	1720	16,0	0,042
CV %	20,6	20,5	42,1	10,3

En el cuadro anterior (Cuadro N° 12) se puede ver que los valores mínimos tanto para el MOE como para el MOR son bajos. Esto es debido principalmente a las tablas provenientes de la tercera troza, en las que la proporción de madera juvenil es mayor (menor edad cambial), también tiene incidencia en el caso del MOR la presencia de nudos de gran tamaño y o la agrupación de nudos. Recordemos que el rodal fue podado hasta 5,5 m de altura (mitad aproximada de la segunda troza).

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

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

En la práctica, solo 28 de las 86 tablas analizadas de la tercer troza califican como madera estructural según la norma JAS (categoría E 90), superando un MOE de 7850 (MPa). De las 28 tablas que califican 4 tablas son "A", 10 tablas son "B" y 14 tablas son "C".

Si descartamos las terceras trozas para el uso estructural en base a lo fundamentado anteriormente, los promedios y otros parámetros estadísticos obtenidos son los que se muestran en el siguiente cuadro N° 13.

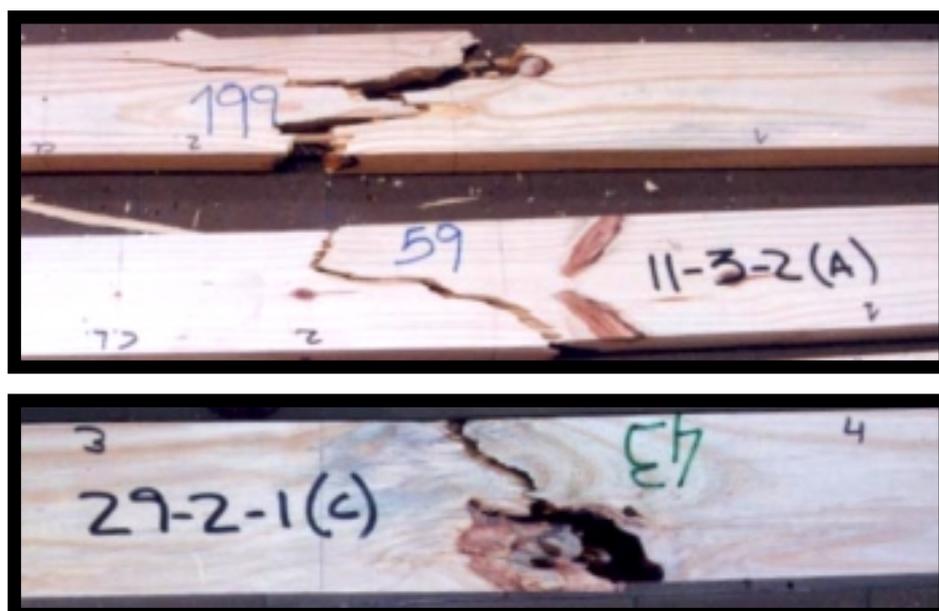
**Cuadro N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" de la 1° y 2° troza**

	<b>MOE (Máquina universal)</b>	<b>MOR</b>	<b>Densidad Corriente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
número	84	84	84
<b>Promedio</b>	<b>8781</b>	<b>44,1</b>	<b>0,416</b>
Máximo	12978	78,1	0,522
Mínimo	4244	10,3	0,344
STD	1885	16,2	0,041
CV %	21,5	36,8	9,8

Teniendo en cuenta estas consideraciones se elevan los promedios y los valores mínimos que son los parámetros utilizados para los cálculos de estructuras. En definitiva estaríamos diciendo que solo 1 tabla "A" de las primer troza, 4 tablas "A" de la segunda troza y 4 tablas "A" de la tercer troza, solo 8 tablas de 72 tablas "A" podrían ser utilizadas como madera estructural. Mas adelante veremos con mayor detalle como se distribuyen los valores de las tablas dentro de las categorías estructurales (según norma JAS).

Observamos que tanto en el cuadro N° 12 como en el N° 13 que los valores mínimos de MOR son muy bajos 8,0 y 10,3 MPa respectivamente. Fueron incluidos en este estudio debido a que son valores obtenidos y que muestran la gran variabilidad que existe en la madera. En un proceso industrial normalmente se realiza una inspección visual para clasificación de madera estructural, estas tablas con valores tan bajos no calificarían y serían descartadas para el uso estructural. Estudiamos por que razón estas tablas presentan valores menores a 15 MPa y observamos que el tipo de rotura (la forma y ubicación en la tabla, ver figura N° 15) no era normal, esto se debió principalmente al agrupamiento de nudos medianos o pequeños o a la presencia de nudos de gran tamaño en la zona media de la tabla y que ocuparon gran parte del ancho de la misma.

Mas adelante en este trabajo veremos la relación entre el MOR de las tablas y el de las pequeñas probetas libres de defectos en tablas "B" y "C", en general estas últimas presentan valores dos veces superiores al de las tablas. En las tablas que presentaron valores de MOR por debajo de 15 MPa se observo que esta relación es mayor, de 5 a 9 veces es el valor de las probetas clear respecto al de las tablas.



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

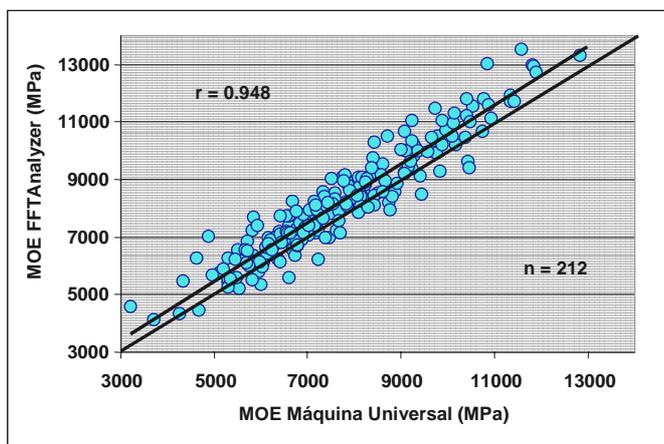
En la figura N° 16, podemos observar a modo de ejemplo dos tablas (las superiores) que presentan diseños de rotura en la zona central de la tabla ensayada y que se pueden considerar típicos en el ensayo de flexión estática, presentando valores de MOR normales o dentro de los valores medios. La tabla inferior presenta un diseño de rotura claramente influenciado por la presencia en la zona central de un gran nudo que ocupa un importante porcentaje del ancho de la tabla, obsérvese también la influencia del grano inclinado a continuación del nudo hacia el canto, esta tabla tiene un valor de MOR del orden de 10,8 MPa y como mencionamos antes no calificaría como madera estructural luego de realizada una inspección visual.

### 6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas

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

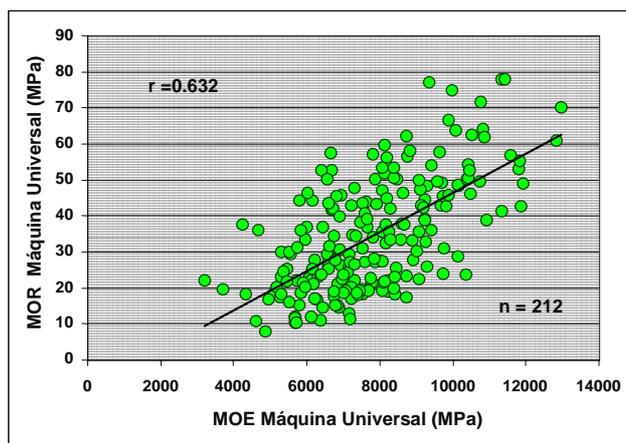
En trabajos anteriores observamos también la buena correlación que existe entre los resultados de MOE obtenidos por medio del equipo FFT Analyzer y los resultados obtenidos con otros equipos similares no destructivos como el Pundit, el Fakopp, Sylvatest, etc.

Observamos que los valores de MOE obtenidos mediante el FFT Analyzer son ligeramente superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal.



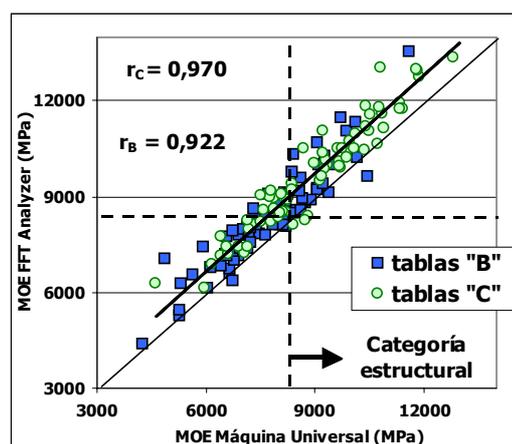
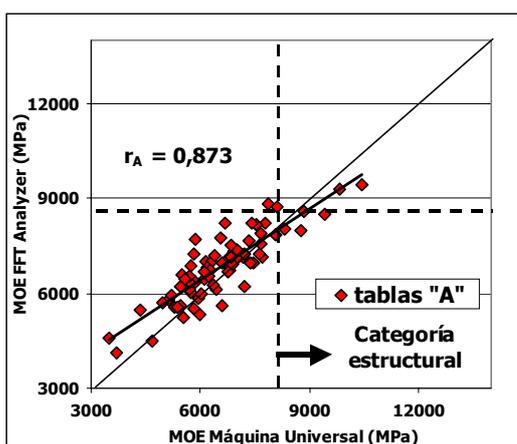
**Gráfico N° 12: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)**

En las tablas no se encontró una alta correlación entre el MOE y el MOR, esto se debe a que el MOR está muy influido por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el MOE, quien está más influido por las características de la madera y la edad cambial. Podemos ver en el gráfico N° 13, a modo de ejemplo que para un valor de MOE de 6000 (MPa) existe una variación de valores de MOR de 10 a 50 (MPa).



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

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



**Gráficos N° 14 y 15: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A" y en tablas "B y C"**

En los gráficos N° 14 y N° 15 que se muestran arriba, se relacionan el MOE obtenido mediante el ensayo de flexión estática con la máquina universal y el MOE obtenido con el FFT Analyzer con el propósito de poder visualizar la magnitud y la dispersión de los valores de MOE para los distintos tipos de tablas. Se agrupan a las tablas "A" en el gráfico N° 14 y a las tablas "B" y "C" en el gráfico N° 15. En el primero se puede ver que las tablas "A" tienen valores de MOE bajos y agrupados, entrando muy poca proporción de estas en la categoría estructural según JAS, mientras que en el gráfico N° 15 se puede ver que tanto las tablas "B" como las "C" tienen una alta dispersión de sus valores, las tablas "C" tienen valores de MOE más altos y varias tablas "B" y "C" entran en la categoría estructural (la categorización de las tablas se analiza con más detalle en un capítulo posterior).

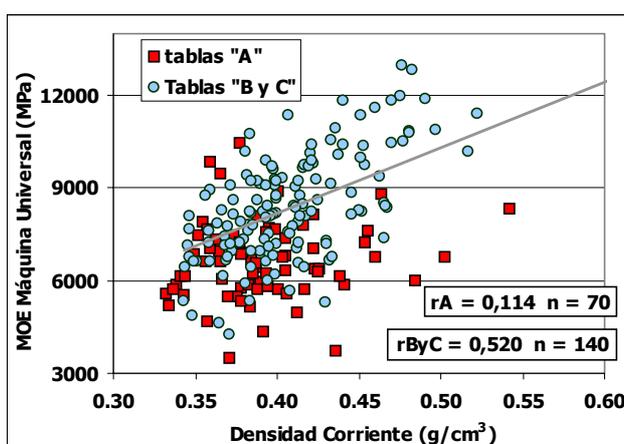
De 72 tablas "A" solo 9 tablas superan el límite de 7850 (MPa) que las habilita como madera estructural según norma JAS, de las 72 tablas "B" 33 tablas superan ese límite y de las 70 tablas "C" 51 tablas podrían usarse como madera estructural.

Por esta razón concluimos que en una clasificación para madera estructural, el primer paso sería descartar las tablas que tienen médula (Tablas "A") o se encuentran muy próximas a la misma. Por el contrario no podemos concluir nada sobre las tablas "B" y "C" ya que tienen una alta dispersión, por lo que la selección debe ser en

base a otros criterios. Como vimos anteriormente la tasa de crecimiento no influye en las propiedades, la variación se debería a la variabilidad entre árboles.

#### 6.2.4 Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas

Se buscó analizar la relación de las propiedades mecánicas con la densidad corriente. Se realizaron análisis para el MOE y el MOR, no encontrando una correlación significativa en el caso de las tablas "A" ( $r = 0,114$ ), si una mejor correlación en los valores de las tablas "B" y "C" ( $r = 0,520$ ) como muestra el gráfico N° 16. Existe para un mismo valor de densidad una muy amplia dispersión de los valores en ambas propiedades mecánicas. Tampoco se encontraría correlación si se analizan las probetas todas agrupadas.



**Gráfico N° 16: Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)**

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

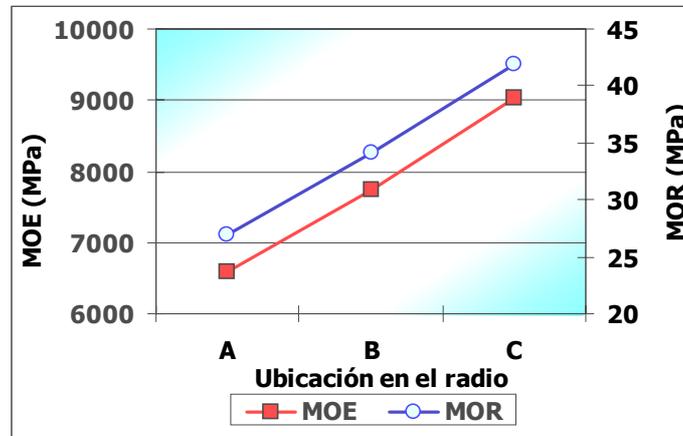
La variación de las propiedades mecánicas en el radio muestra una tendencia muy clara. Todas las propiedades aumentan a medida que se alejan de la médula y se acercan a la corteza. Es decir, la madera juvenil tiene valores menores para todas las propiedades mecánicas que la madera adulta y estos valores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

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

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

Ubicación de la tabla	Número de tablas	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Maquina Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
A	72	6849	6577	27	0,393
B	70	8324	7739	34	0,399
C	70	9775	9026	42	0,420

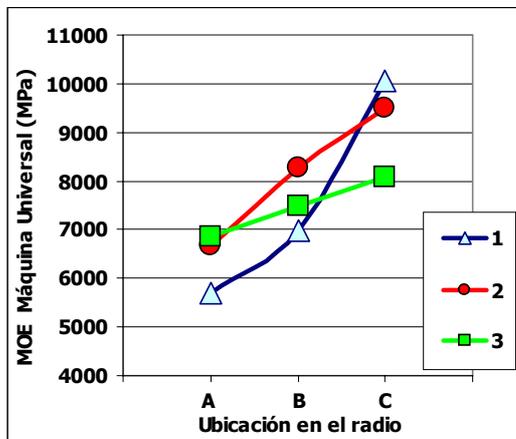
En el gráfico N° 17, podemos observar claramente la tendencia de los valores tanto de MOE como de MOR, que aumentan linealmente a medida que nos acercamos a la corteza.



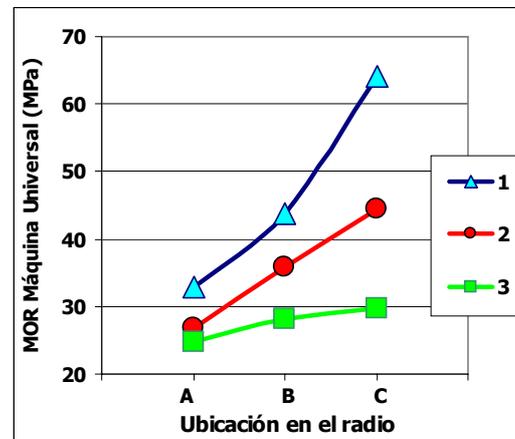
**Gráfico N° 17: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio**

### 6.2.5.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Si se analiza la variación en el radio de las propiedades para las distintas alturas por separado, el comportamiento encontrado es el mismo para todas las alturas e igual al promedio. Para cualquier altura las tablas "C" son superiores, o dicho en otras palabras cuanto más edad cambial tiene la madera, mayores son sus propiedades mecánicas.



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



**Gráfico N° 19: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura**

Los valores de MOR (gráfica N° 19) para las tablas "A" son bastante constantes con la altura mientras que en las tablas "B" y "C", estos valores de las tablas de la troza basal superaron a las de las segundas trozas y estas a la vez fueron mayores que las de las terceras. Esto se debe a que cuanto más abajo están ubicadas las tablas, corresponde a madera de mayor edad, o con menor proporción de madera juvenil. En la troza basal las tablas "C" tenían en promedio madera de 16 años, en la segunda troza de 13 años y en la tercera de 11.

Para el caso del MOE (gráfico N° 18) el comportamiento es bastante diferente para las tablas "A" y "B" en las tres alturas, las tablas "C" tienen un comportamiento similar al del MOR y la tendencia general es que aumenten los valores a medida que nos alejamos de la médula.

Debemos estudiar en el futuro este comportamiento que podríamos denominar como fuera de lo normal, con ensayos de esta especie de otros sitios. En el estudio realizado en *Pinus elliottii* del Litoral vimos que el comportamiento del MOE es muy similar al del MOR en el radio según la ubicación en la altura, teniendo el *Pinus taeda* estudiado valores superiores en las dos propiedades.

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

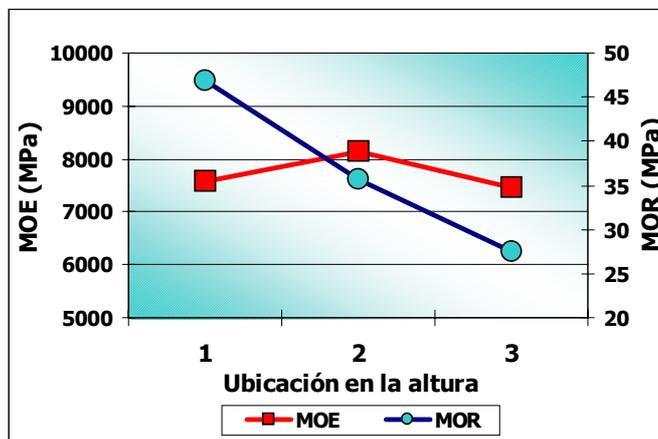
Los valores promedio de MOE son superiores en la segunda troza, para el MOR los valores promedio son más altos en la troza basal, siendo menor en la segunda troza y menor aún en la tercera.

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

Altura	Número De tablas	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máq. Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
1	36	7734	7579	47	0,423
2	90	8774	8144	36	0,404
3	86	8045	7457	28	0,395

Se puede ver en el cuadro N° 15 y en el gráfico N° 20 que la altura afecta en menor medida a los valores de MOE que a los valores de MOR. En cuanto al MOR vemos que su comportamiento es debido principalmente a la incidencia que tiene en esta propiedad la presencia de nudos (poda 5,5 m).

En cuanto al comportamiento de la densidad corriente es similar al del MOR disminuyen los valores a medida que aumentamos en la altura.



**Gráfico N° 20: MOE y MOR según ubicación en altura**

### 6.2.6.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación en altura para cada una de las ubicaciones en el radio, observamos un comportamiento similar al promedio. La tendencia general es que las propiedades mecánicas disminuyen a medida que aumenta la altura. Este comportamiento no es tan claro en el caso del MOE en las probetas "A" en las que los valores aumentan en la altura y en las "B" aumentan en la altura pero tienen el mayor valor en la segunda troza (Gráfico N° 21).

En el caso del MOR los valores disminuyen a medida que avanzamos en la altura, manteniendo las probetas "A" los valores mas bajos seguidas de las "B" y luego las "C" con los valores mas altos. Podemos ver que en la tercer troza los valores promedio de MOR para los tres tipos de probetas son muy similares (Gráfico N° 22).

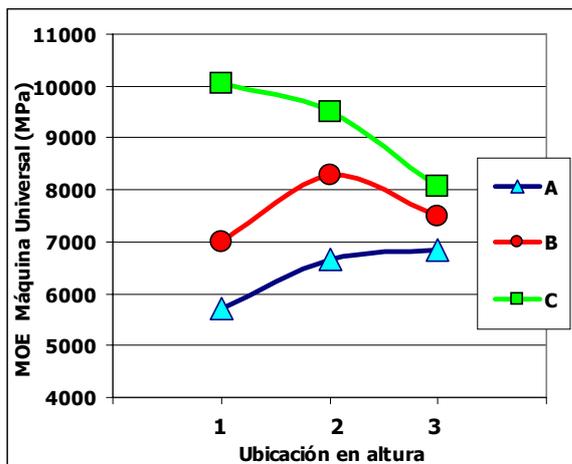


Gráfico N° 21: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

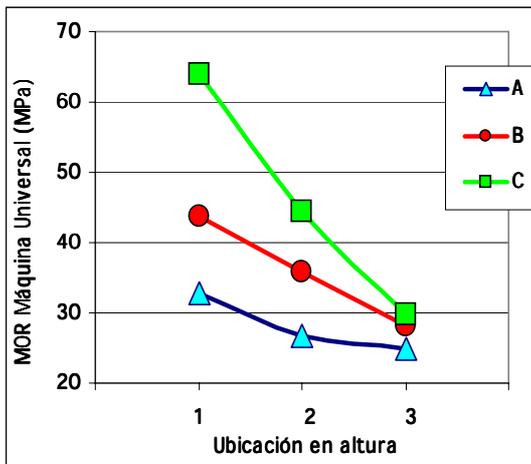


Gráfico N° 22: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura

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

Se estudio 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.

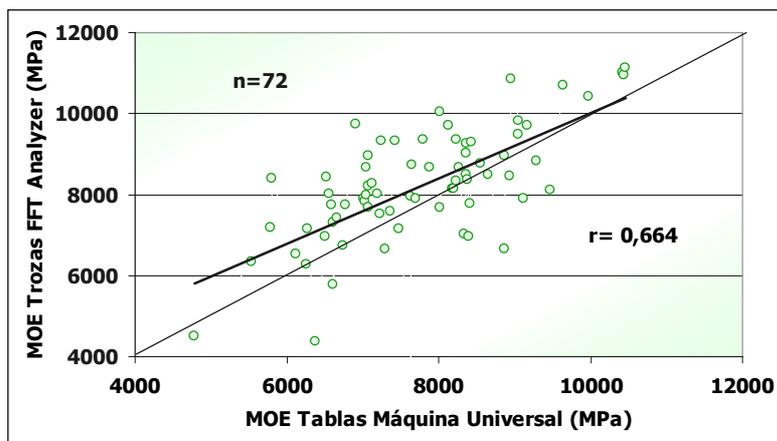


Gráfico N° 23: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas

A diferencia del *Pinus elliottii* Eng. estudiado y los resultados publicados en "Propiedades Mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral del Uruguay, (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino "GT3", Informe N° 1, Octubre 2002) si se observó una relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas de estas trozas ( $r = 0,664$ ), recordemos que para *Pinus elliottii* fue ( $r = 0,353$ ) y ( $r = 0,78$  y  $r = 0,74$  para la primera y la segunda troza respectivamente).

Analizando esta relación por la ubicación en la altura de la troza, encontramos que para las primeras trozas el coeficiente de correlación fue ( $r = 0,681$ ), para las segundas trozas fue ( $r = 0,745$ ) y para las terceras trozas fue ( $r = 0,799$ ). Vemos que a medida que subimos en la altura del fuste mejora la correlación. Esto posiblemente se debe por que a mayor altura menor diámetro y menor volumen de madera, recordemos que de cada troza tomamos tres tablas y cuanto menor sea el diámetro mayor es la proporción de la madera de esa troza que analizamos.

Los resultados obtenidos por el Proyecto LATU-JICA en trozas básales (Pérez del Castillo, Informe de Investigación N° 7 *Pinus elliottii*, Agosto 2001) y los que se puede ver en la bibliografía muestran que existe cierta correlación entre el MOE de las trozas y el de las tablas.

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

### 6.2.8 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS

En los siguientes cuadros N° 16 y N° 17 se muestra la clasificación de las tablas según la norma JAS (Japan Agricultural Standard) para madera de coníferas de uso estructural. Según dichas normas a partir de las categorías E90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa), la madera puede ser utilizada con fines estructurales en la construcción.

Para el caso del *Pinus taeda* en estudio, el 44% de las tablas se encontraron en la categoría E90 o mayor. Podemos ver que en la categoría anterior (E 70 de 5880 a 7850 MPa) se concentra un 42 % de del total de las tablas, que no calificarían para uso estructural. Con respecto a esto decimos que disminuyendo la distancia entre apoyos (ejemplo: viga) y o aumentando la sección podríamos utilizar parte de estas tablas para dichos usos.

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

**Cuadro N° 16: Proporción de tablas según categoría JAS**

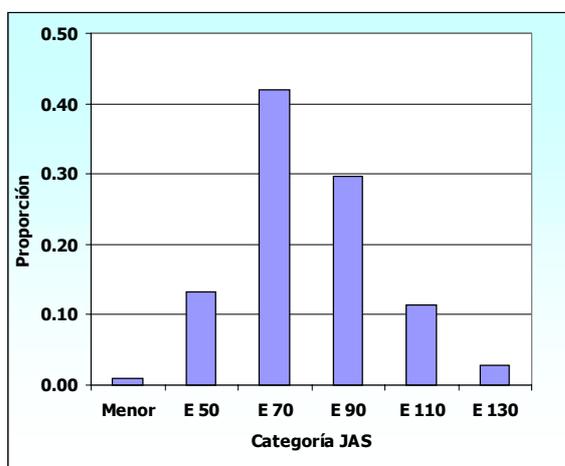
Categoría JAS	MOE $10^3 \text{kgf/cm}^2$	MOE Máquina Universal ( MPa )	Promedio Tablas	
			Cantidad (212)	Proporción
<E 50			2	0,01
E 50	40-60	3920-5880	28	0,13
E 70	60-80	5880-7850	89	0,42
E 90	80-100	7850-9810	63	0,30
E 110	100-120	9810-11770	24	0,11
E 130	120-140	11770-13730	6	0,03

En el gráfico N° 24 representamos la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que en los rangos E 70 y E 90 se concentra un 70 % de las tablas ensayadas.

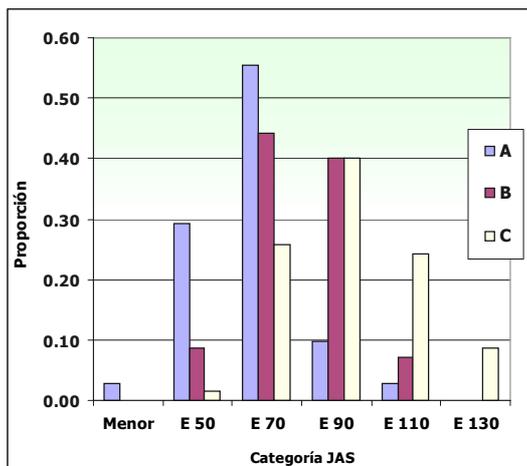
En el gráfico N° 25 vemos esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla (A-B-C), donde la mayoría de las tablas que pueden utilizarse como madera estructural son tablas "C" y "B", donde el 73 % de las tablas "C" son aptas para uso estructural, el 47 % de las tablas "B" y solo el 13 % de las tablas "A" (ver cuadro N° 17).

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

Categoría JAS	MOE 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	MOE ( MPa )	Tabla A		Tabla B		Tabla C	
			Cant	Prop	Cant	Prop	Cant	Prop
< E 50			2	0,03		0,00		0,00
E 50	40-60	3920-5880	21	0,29	6	0,09	1	0,01
E 70	60-80	5880-7850	40	0,56	31	0,44	18	0,26
E 90	80-100	7850-9810	7	0,10	28	0,40	28	0,40
E 110	100-120	9810-11770	2	0,03	5	0,07	17	0,24
E 130	120-140	11770-13730		0,00		0,00	6	0,09
<b>Proporción de tablas de categoría estructural</b>			<b>0,13</b>		<b>0,47</b>		<b>0,73</b>	



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



**Gráfico N° 25: Proporción de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS**

Analizamos el porcentaje de tablas A-B-C que según la norma JAS calificarían como madera para uso estructural, discriminándolas también por la altura del fuste (primer, segunda y tercer troza). Recordemos que a partir de la categoría E90 inclusive (MOE igual o superior a 7850 MPa) la madera sería apta para uso estructural (ver cuadro N° 18).

Debemos aclarar que la diferencia en el número de tablas entre el cuadro N° 17 y el cuadro N° 18 es debida a que en este último se incluyeron las tablas provenientes de las 18 primeras trozas ensayadas dentro del Proyecto JICA-LATU, estas fueron incluidas para poder analizar las distintas alturas en igualdad numérica de tablas.

**Cuadro N° 18: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS**

Tablas por Troza	Tablas A		Tablas B		Tablas C	
	Cantidad	Aptas (%)	Cantidad	Aptas (%)	Cantidad	Aptas (%)
Primera 90 tablas	3	10,0	14	46,7	25	83,3
Segunda 90 tablas	4	13,3	19	63,3	27	90,0
Tercera 86 tablas	4	13,3	10	33,3	14	50,0
<b>Total</b>	<b>11</b>		<b>43</b>		<b>66</b>	

De las primeras trozas se obtuvieron 30 tablas "A" de las cuales solo 3 el 10,0 % califica como madera estructural, de las segundas trozas se obtuvieron 30 tablas "A" solo 4 el 13,3 % califican, de las terceras trozas se obtuvieron 30 tablas "A" y de estas solo 4 el 13,3 % calificaron. Del total de las 90 tablas "A" provenientes de las trozas de las tres alturas 11 de ellas el 12,2 % califica como madera estructural, de las 90 tablas "B" 43 el 47,7 % califica, de las 86 tablas "C" 66 el 76,7 % califica.

Si tomamos las tablas de la primera y segunda troza, o sea la madera hasta 8 m de altura, vemos que de las 60 tablas "A" obtenidas solo 7 el 11,7 % califica como madera estructural, que de las 60 tablas "B" 33 el 55,0 % califica y que de las 60 tablas "C" 52 el 86,7 % de ellas califica. Sumando las tablas "B" y "C" de la primera y segunda troza obtenemos 120 tablas de las cuales 85 el 86,7 % de ellas serían aptas para el uso como madera estructural para la construcción.

En el primer informe del Grupo Técnico de Madera Aserrada se mostraron los resultados de los estudios de caracterización de la madera de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral del Uruguay, a continuación mostraremos a modo de comparación un cuadro similar (cuadro N° 19) al realizado en *Pinus taeda*, con datos de *Pinus elliottii* del primer informe.

**Cuadro N° 19: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS – *Pinus elliottii* Eng. del Litoral**

Tablas por Troza	Tablas A		Tablas B		Tablas C	
	Cantidad	Aptas (%)	Cantidad	Aptas (%)	Cantidad	Aptas (%)
<b>Primera 87 tablas</b>	<b>2</b>	<b>6,9</b>	<b>16</b>	<b>53,3</b>	<b>21</b>	<b>75</b>
<b>Segunda 83 tablas</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>17,9</b>	<b>18</b>	<b>62,1</b>
<b>Tercera 76 tablas</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>3,8</b>	<b>4</b>	<b>16,7</b>
<b>Total</b>	<b>2</b>		<b>22</b>		<b>43</b>	

Teniendo en cuenta los mismos criterios de clasificación utilizados para *Pinus taeda* podemos decir que de las 81 tablas "A" obtenidas solo 2 el 2,5 % son iguales o mayores a 7850 MPa de MOE y por lo tanto aptas como madera estructural, de las 84 tablas "B" solo 22 el 26,2 % son aptas y de las 81 tablas "C" 43 el 53,1 % son aptas. De un total de 246 tablas solo 67 el 27,2 % podría ser utilizada como madera estructural. Debemos aclarar también que se incluyeron en este análisis las tablas provenientes de las primeras trozas (18) estudiadas por el Proyecto JICA-LATU.

### 6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos

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

#### 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 10,6%.

Los cuadros N° 20 y N° 21 que siguen muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las probetas provenientes de todas las tablas (A, B y C).

**Cuadro N° 20: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas**

	FLEXIÓN ESTÁTICA			
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	Contenido de Humedad (%)
Número	211	211	208	208
<b>MEDIA</b>	<b>8190</b>	<b>73,0</b>	<b>0,398</b>	<b>10,6</b>
Máximo	16597	119,1	0,534	13,0
Mínimo	2440	37,7	0,304	8,8
Desvío std.	2065	13,7	0,042	0,66
<b>CV (%)</b>	<b>25,2</b>	<b>18,7</b>	<b>10,5</b>	<b>6,1</b>

**Cuadro N° 21: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas**

	FLEXIÓN DINÁMICA Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )	DUREZA JANKA		
		Radial (MPa)	Tangencial (MPa)	Transversal (MPa)
Número	211	212	212	15
<b>MEDIA</b>	<b>2,57</b>	<b>26,6</b>	<b>28,3</b>	<b>36,4</b>
Máximo	6,30	51,1	54,3	50,5
Mínimo	0,75	13,9	11,8	24,7
Desvío std	0,89	6,6	8,7	6,82
<b>CV (%)</b>	<b>34,8</b>	<b>24,9</b>	<b>30,9</b>	<b>18,7</b>

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

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

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

El comportamiento de las pequeñas probetas libres de defectos confirma lo observado para las tablas, la variación de las propiedades mecánicas en el radio muestra una tendencia muy clara. Todas las propiedades aumentan a medida que se alejan de la médula. Es decir aumentan a medida que aumenta la edad cambial (del cambium) de la madera.

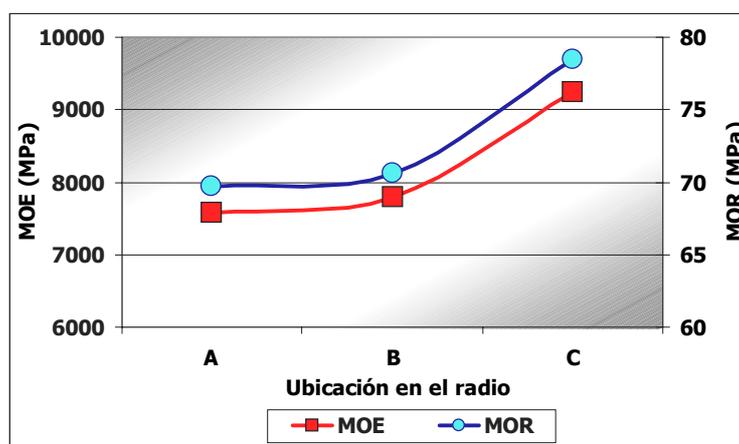
**Cuadro N° 22: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
A	71	7567	25,9	69,7	17,3	0,387	10,5
B	72	7796	21,9	70,6	17,8	0,392	8,4
C	70	9233	23,3	78,5	18,8	0,418	10,9

**Cuadro N° 23: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio**

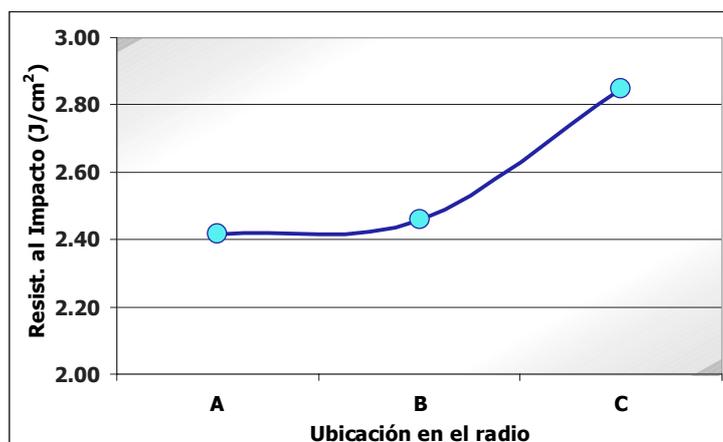
Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka radial (MPa)		Dureza Janka tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
A	71	2,42	36,6	25,3	24,7	26,1	28,0
B	72	2,46	33,4	26,3	27,8	27,9	28,8
C	70	2,85	32,3	28,5	20,8	31,5	32,6

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

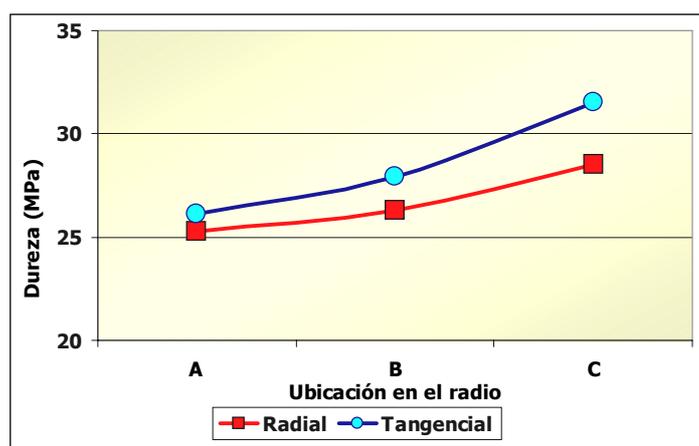


**Gráfico N° 26: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio**

Tanto para el MOE como para el MOR, el incremento es leve entre la probeta "A" y la probeta "B", aumentando marcadamente hacia la probeta "C". Para la resistencia al Impacto la variación es similar al MOE y el MOR. Este comportamiento es distinto al observado en el estudio de *Pinus Elliottii* Eng. (Primer informe, GT3, Octubre 2002), en el cual el mayor incremento es entre las probetas "A" y "B", creciendo luego en forma muy leve entre la probeta "B" y "C".



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



**Gráfico N° 28: 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 no tiene un comportamiento tan homogéneo como en el radio, pero en general se observa que los valores de las propiedades disminuyen a medida que aumenta la altura.

**Cuadro N° 24: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura**

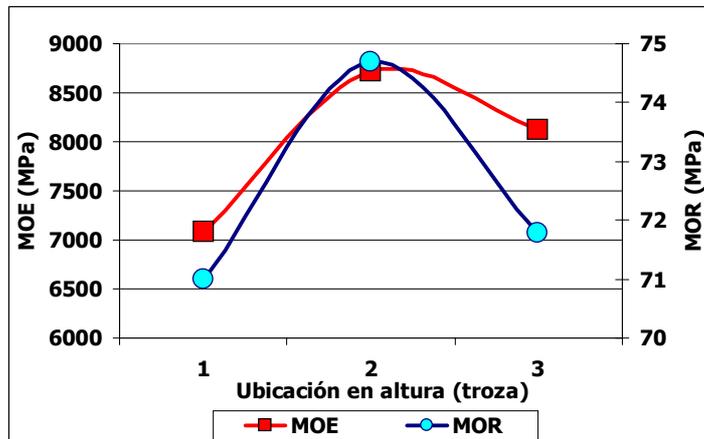
Troza	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	34	7079	35,9	71,0	15,1	0,421	9,1
2	83	8712	19,4	74,7	13,4	0,401	9,8
3	78	8121	18,2	71,8	15,0	0,387	9,2

**Cuadro N° 25: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura**

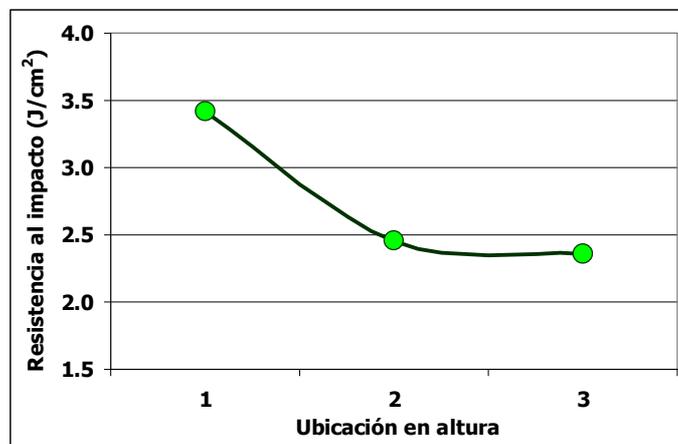
Troza	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka Tangencial (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	34	3,4	29,8	20,8	2,6	32,4	3,7
2	83	2,5	30,9	26,4	2,1	28,7	2,5
3	78	2,4	29,1	25,2	2,3	26,7	2,9

Se observa un comportamiento singular en el MOE en la troza basal (alto coeficiente de variación, 35,9 %). Recordemos que el comportamiento para el MOE en las tablas (2"x 6") fue similar, en la segunda troza los valores fueron superiores. Esto puede estar dado por el hecho de que no se tiene certeza de que parte de la tabla se extrajeron las probetas, es decir pueden haberse tomado tanto a 3 m de altura, como de la zona cercana al suelo (base del árbol). En la parte basal del árbol (primeros 70 cm) sabemos y la bibliografía muestra que existe una zona en que hay presencia de madera diferente, cuyas propiedades físicas y mecánicas son distintas a las del resto del árbol, normalmente las últimas son de menor magnitud.

En el caso del MOR al igual que el MOE se observa que en la segunda troza se verifica el valor más alto. En la dureza y en la resistencia al impacto se observa que la evolución de las propiedades en altura presenta una tendencia clara, que es una disminución de su magnitud a medida que aumenta la altura.

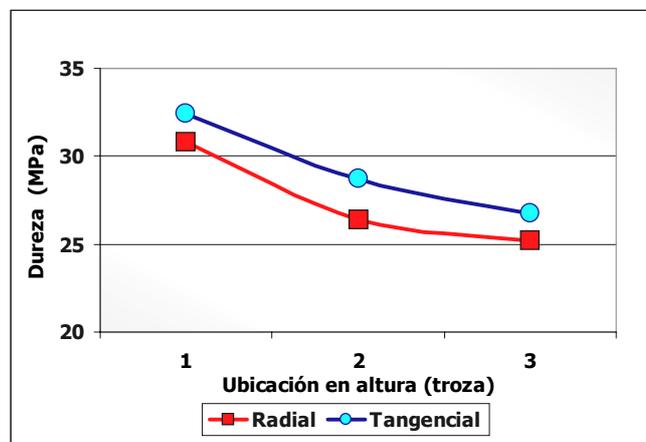


**Gráfico N° 29: MOE y MOR promedio según ubicación en altura**



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

La menor magnitud de las propiedades en la tercer troza se debe a que en esta 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 la resistencia al impacto.



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

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

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

Se puede observar en los gráficos N° 32 y 33, que para la mayoría de los casos el aumento más marcado corresponde a la troza basal, cosa que es muy razonable ya que en esta troza, por ser la de mayor edad, es donde van a existir mayores diferencias de edad cambial de la madera de las distintas probetas. En el otro extremo está la troza tres que es de menor edad, en la que las magnitudes de las propiedades se parecen por que las probetas están más próximas y compuestas por madera de más parecida edad. Tiene una alta proporción de madera juvenil. En esta troza sucede que ciertas probetas "C" contienen madera de similar edad que la probeta "B" de la primera troza.

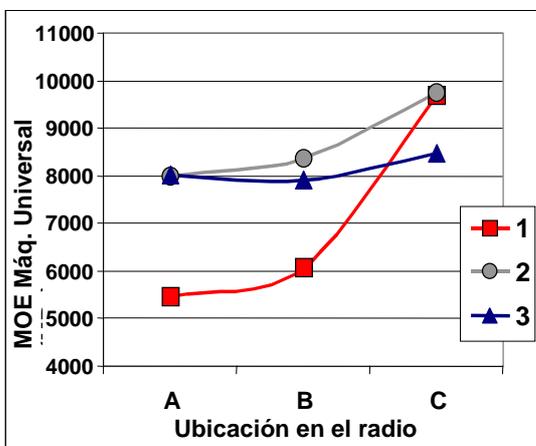


Gráfico N° 32: MOE promedio por altura según ubicación en el radio

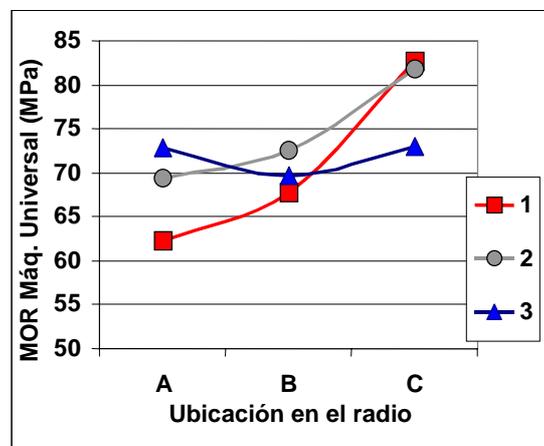


Gráfico N° 33: MOR promedio por altura según ubicación en el radio

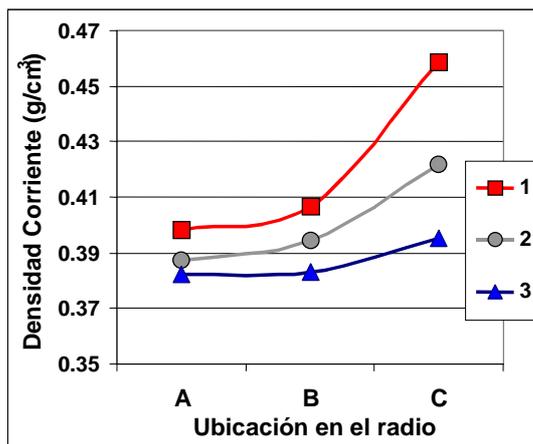


Gráfico N° 34: Densidad corriente por altura según ubicación en el radio

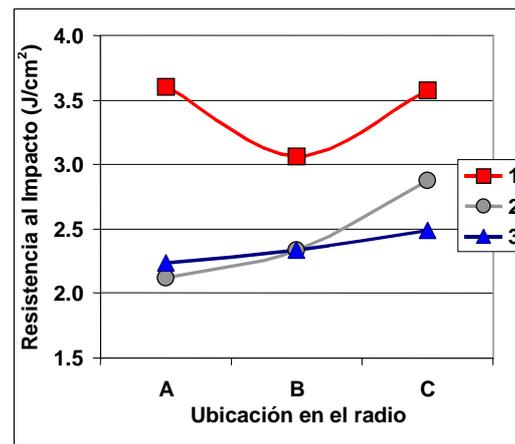
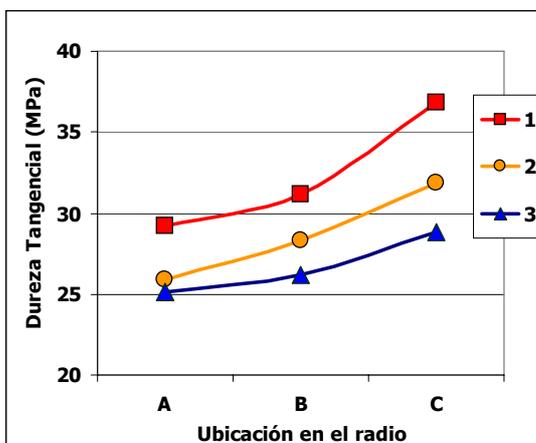
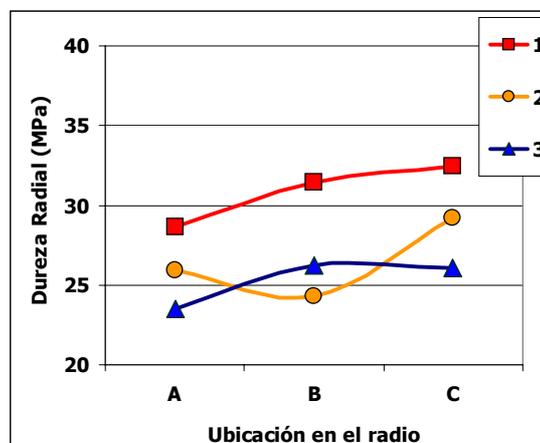


Gráfico N° 35: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio

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



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

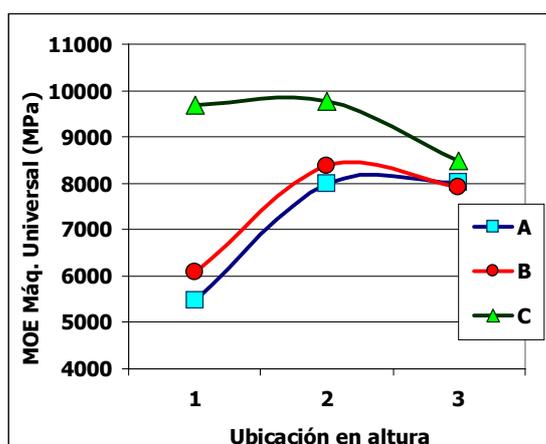


**Gráfico N° 37: Dureza radial por altura según ubicación en el radio**

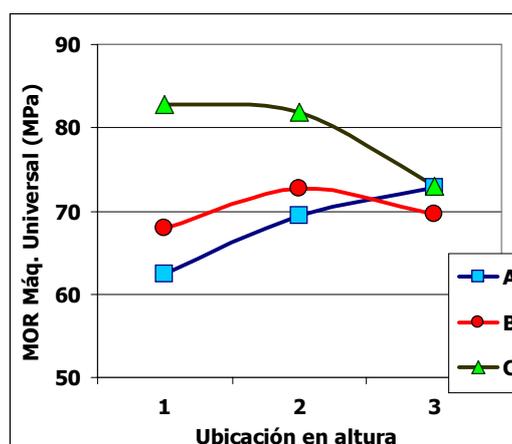
### 6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura

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

Se puede observar en los gráficos N° 38, 39, 40, 41, 42 y 43, que para todas las propiedades, las probetas "C" tienen las mayores magnitudes, para todas las alturas analizadas. Esta diferencia se van acortando con la altura desapareciendo o siendo poco claras para la tercera troza, básicamente por la edad de la troza a los 11 m de altura en la que existe un alto porcentaje de madera juvenil (razones expuestas en el capítulo anterior). Por el contrario para todos los casos las probetas "A" son las que tienen los menores valores para todas las propiedades mecánicas.



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



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

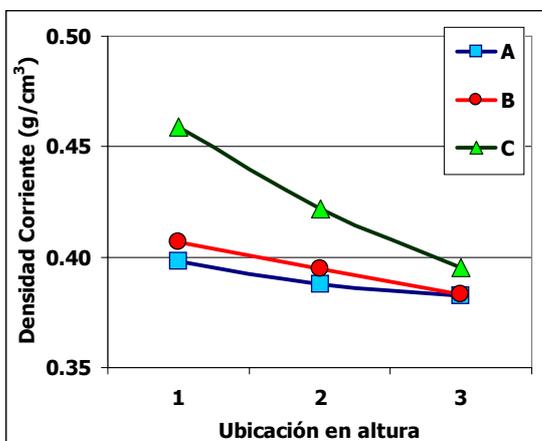


Gráfico N° 40: Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura

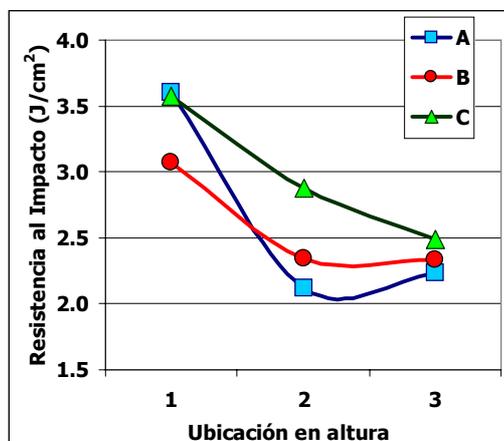


Gráfico N° 41: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura

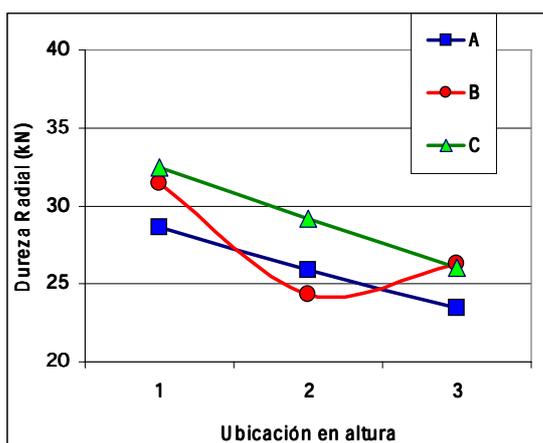


Gráfico N° 42: Dureza radial por ubicación en el radio según altura

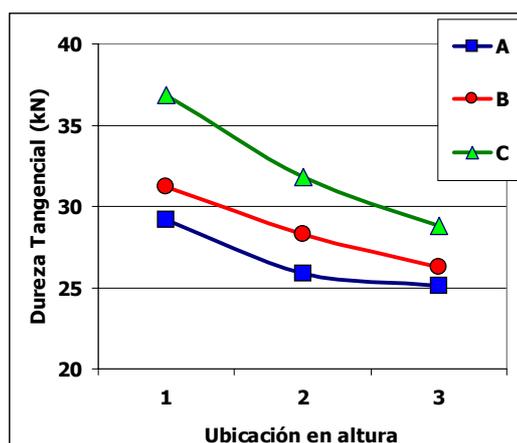


Gráfico N° 43: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura

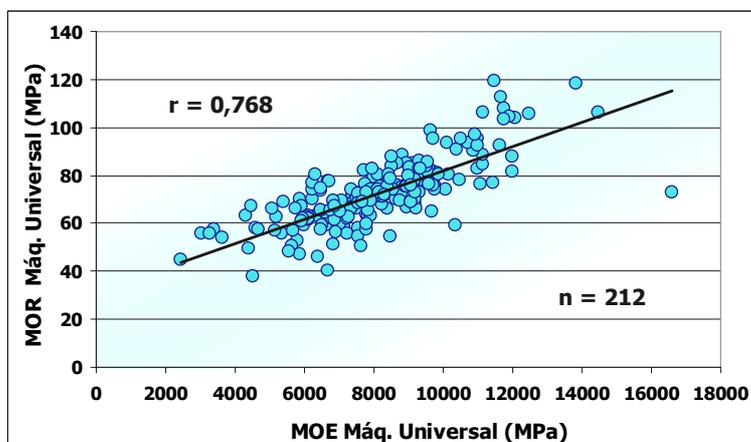
### 6.3.6 Relación entre las distintas propiedades

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

Cuadro N° 26: Relaciones entre las distintas propiedades

N = 212	MOE	MOR	Resistencia al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Densidad Corriente
MOE	1	<b>0,768</b>	0,113	0,075	0,091	<b>0,517</b>
MOR		1	0,179	0,149	0,158	<b>0,590</b>
Resistencia al Impacto			1	0,373	0,424	0,402
Dureza Radial				1	0,387	0,355
Dureza Tangencial					1	0,393
Densidad Corriente						1

Como se puede ver en el cuadro N° 26, las únicas propiedades con cierta correlación entre si son el MOE y el MOR. Las otras propiedades no están correlacionadas entre si o lo están en una forma muy leve como la densidad corriente con el MOE y el MOR.



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

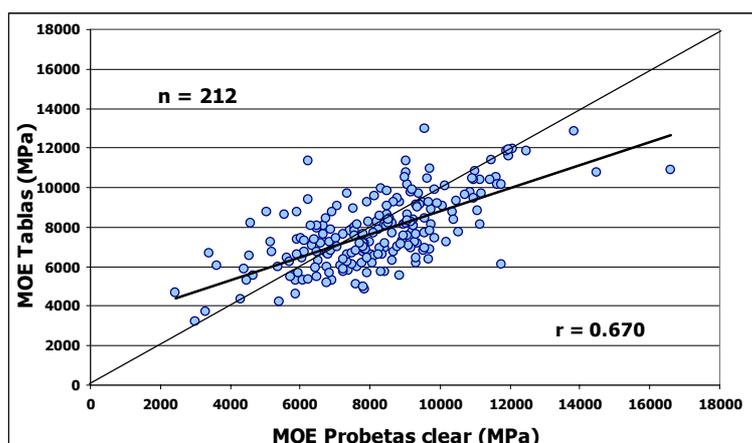
### 6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos

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

**Cuadro N° 27: Relación entre las propiedades mecánicas de tablas y las pequeñas probetas libres de defectos**

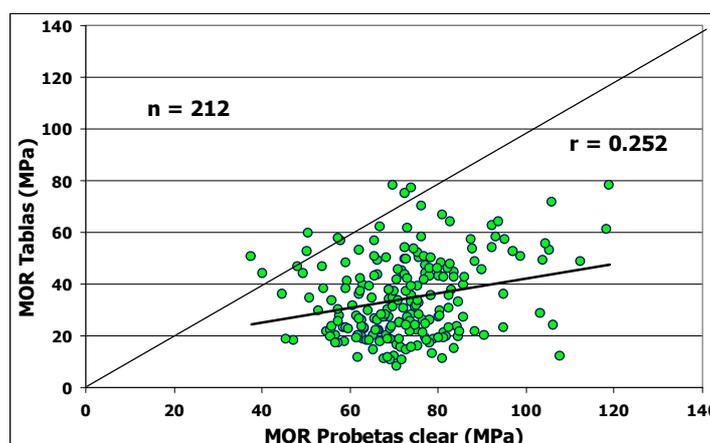
Probeta N°	FLEXIÓN ESTÁTICA PROBETAS B Y C			
	Probetas libres de defectos		Tablas	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	211	211	212	212
<b>Media</b>	<b>8190</b>	<b>73,0</b>	<b>7769</b>	<b>34,3</b>
Máximo	16597	119,1	12978	78,1
Mínimo	2440	37,7	3206	8,0
Desvío std	2065	13,7	1799	15,5
<b>CV (%)</b>	<b>25,2</b>	<b>18,7</b>	<b>23,2</b>	<b>45,2</b>

Se encontró cierta relación entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear que se obtuvieron de las mismas (gráfico N° 45,  $r = 0,670$ ). Teniendo en cuenta esto y los resultados de otras investigaciones realizadas en pinos y eucaliptos podemos decir que el MOE es una propiedad que no es influida en gran medida por los nudos de la tabla sino que depende de las características de la madera. El valor medio del MOE tablas fue de 7769 MPa y el de probetas clear 8190 MPa este último es solamente un 5 % superior.



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

Para el MOR no se observó correlación entre los valores encontrados en tablas y en los valores de las pequeñas probetas obtenidas de estas (gráfico N° 46,  $r = 0,252$ ). 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 34,3 MPa y para probetas clear fue de 73,0 MPa, vemos que existe una gran diferencia entre ambos valores, mas de dos veces superior el valor de las probetas clear.



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

Se observaron similares relaciones entre el MOR de probetas clear y el MOR de tablas en estudios realizados en *Pinus elliottii* Eng. (Informe N° 1, Propiedades Mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay, Grupo Técnico de Madera Aserrada, Octubre 2002) y en otros estudios realizados en el Sector Productos Forestales del LATU, en *Pinus taeda* y *elliottii* de otras regiones del país.

En general para todas las propiedades se observaron tendencias similares tanto para *Pinus taeda* como para *Pinus elliottii*, pero existen diferencias en los valores puntuales entre las especies y los sitios de donde provienen.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

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

**FICHA TECNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS**Especie : *Pinus taeda* L.Ensayos realizados en 30 árboles de 24 años de edad  
Localidad de origen : Río Negro**Propiedades Físicas**

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm <sup>3</sup>	0,384
Densidad Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm <sup>3</sup>	0,409

**Propiedades Mecánicas**En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 9,3%  
(Tablas B y C de las 1<sup>ras</sup> y 2<sup>das</sup> trozas)

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (FFT Analyzer)		MPa	9253	Kgf/cm <sup>2</sup>	94355
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	8781	Kgf/cm <sup>2</sup>	89540
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	44,1	Kgf/cm <sup>2</sup>	450

En pequeñas probetas libres de defectos – CH = 10,6 %

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	8190	Kgf/cm <sup>2</sup>	83515
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	73,0	Kgf/cm <sup>2</sup>	744
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm <sup>2</sup>	2,6	Kgf.m/cm <sup>2</sup>	0,27
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	26,6	Kgf	271
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	28,3	Kgf	289
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	36,4	Kgf	371

**TABLA DE CONVERSIÓN DE UNIDADES**

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

**Solo para Dureza Janka**

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

## Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos

Figuras	Página
N° 1: Muestreo y distribución de las trozas _____	6
N° 2: Orden en la realización de los trabajos _____	7
N° 3: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	8
N° 4: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie _____	8
N° 5: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer _____	10
N° 6 y 7: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trozas _____	10
N° 8 y 9: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6") _____	11
N° 10: Continuación de los ensayos en tablas 2"x 6" _____	11
N° 11: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	12
N° 12: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	13
N° 13: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal _____	15
N° 14: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	16
N° 15: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	16
N° 16: Tipo de rotura por tensión y por corte en área nudosa _____	25

Cuadros	Página
N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	6
N° 2: Datos técnicos del rodal _____	6
N° 3: Podas realizadas _____	6
N° 4: Raleos realizados _____	7
N° 5: Grados de clasificación de las trozas _____	7
N° 6: Proporción de las trozas según la categoría a la que pertenecen _____	17
N° 7: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Básica _____	17
N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en el radio _____	18
N° 9: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en altura _____	20
N° 10: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza _____	22
N° 11: MOE promedio con y sin corteza _____	22
N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C) _____	24
N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1° y 2° troza _____	25
N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio _____	28
N° 15: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en la altura _____	30
N° 16: Proporción de tablas según categoría JAS _____	32
N° 17: Proporción de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	33
N° 18: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS _____	33
N° 19: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS - <i>Pinus elliottii</i> Eng. del litoral _____	34
N° 20: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	35
N° 21: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	35
N° 22: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	35
N° 23: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	36
N° 24: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	37
N° 25: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	37
N° 26: Relación entre las distintas propiedades _____	41
N° 27: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de Defectos (probetas "B" y "C") _____	42

<b>Gráficos</b>	<b>Página</b>
N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación radial _____	18
N° 2: Densidad Básica según anillo medio de la probeta _____	19
N° 3: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio _____	19
N° 4: Densidad Básica por altura según ubicación en el radio _____	19
N° 5: Contenido de Humedad y Densidad Básica según ubicación en la altura _____	20
N° 6: Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura _____	21
N° 7: Densidad Básica por probeta según ubicación en altura _____	21
N° 8: Variación de los valores de MOE entre árboles _____	21
N° 9: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza y sin corteza según posición en altura _____	22
N° 10: Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza _____	23
N° 11: Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE promedio _____	23
N° 12: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer) _____	26
N° 13: Relación entre el MOR y el MOE _____	27
N° 14 y 15: Relación entre el MOE (Máq. Universal) y el MOE (FFT Analyzer) en tablas "A" y en Tablas "B y C" _____	27
N° 16: Relación entre la Densidad Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal) _____	28
N° 17: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio _____	29
N° 18: MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	29
N° 19: MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura _____	29
N° 20: MOE y MOR según ubicación en altura _____	30
N° 21: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	31
N° 22: MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura _____	31
N° 23: Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas _____	31
N° 24: Proporción de tablas ensayadas según categoría JAS _____	33
N° 25: Proporción de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS _____	33
N° 26: MOE y MOR promedio según ubicación en el radio _____	36
N° 27: Resistencia al Impacto según ubicación en el radio _____	36
N° 28: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio _____	37
N° 29: MOE y MOR promedio según ubicación en altura _____	38
N° 30: Resistencia al Impacto según ubicación en altura _____	38
N° 31: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura _____	38
N° 32: MOE promedio por altura según ubicación en el radio _____	39
N° 33: MOR promedio por altura según ubicación en el radio _____	39
N° 34: Densidad corriente por altura según ubicación en el radio _____	39
N° 35: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio _____	39
N° 36: Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio _____	40
N° 37: Dureza radial por altura según ubicación en el radio _____	40
N° 38: MOE promedio por ubicación en el radio según altura _____	40
N° 39: MOR promedio por ubicación en el radio según altura _____	40
N° 40: Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura _____	41
N° 41: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura _____	41
N° 42: Dureza radial por ubicación en el radio según altura _____	41
N° 43: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura _____	41
N° 44: Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos _____	42
N° 45: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	43
N° 46: Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas _____	43