

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE**  
*Pinus elliottii* Eng  
**DEL NORTE DEL URUGUAY**

**Informe N° 7**  
**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  
Facultad de Agronomía  
INIA - Programa Nacional Forestal  
LATU - Departamento de Proyectos Forestales

Marzo 2008

## Organización del Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto

<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. Agr. Carlos Mantero	Facultad de Agronomía
Ing. Agr. Fernando Resquin	INIA Programa Nacional Forestal
Dr. Sadaaki Ohta	LATU Dpto. Proyectos Forestales
Per. Agr. Hugo O'Neill	LATU Dpto. Proyectos Forestales
Tec. Agr. Felipe Tarigo	LATU Dpto. Proyectos Forestales
Ing. Quím. Raúl de Castro	LATU Dpto. Proyectos Forestales
Sr. Dilvar Silva	LATU Dpto. Proyectos Forestales
Sr. Francisco Gatto	LATU Dpto. Proyectos Forestales

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

### Agradecimientos

Por el apoyo a FYMNSA que suministro el material que hizo posible la realización de este estudio y a Industrias Forestales Puerto Arazatí S.A. por el secado de las vigas.



**Dirección General Forestal M.G.A.P.**



**Sociedad de Productores Forestales**



**Asociación de Industriales de la Madera**



**Facultad de Agronomía**



**INIA – Programa Nacional Forestal**



**LATU - Departamento de Proyectos Forestales**

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

e-mail: [honeill@latu.org.uy](mailto:honeill@latu.org.uy) : [ftarigo@latu.org.uy](mailto:ftarigo@latu.org.uy)

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIALES</b>	<b>1</b>
	2.1 Muestreo y clases diamétricas de los árboles	1
	2.2 Características de el rodal muestreado	2
	2.2.1 Datos técnicos del rodal	2
	2.2.2 Tratamientos silviculturales (podas y raleos)	3
<b>3.</b>	<b>ENSAYOS EN LAS TROZAS</b>	<b>3</b>
	3.1 Clasificación visual de las trozas	3
	3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica	4
	3.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) de las trozas, por el método de ensayo no destructivo FFT Analyzer	5
	3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas 50 x 150 mm (2" X 6")	6
<b>4.</b>	<b>ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 50 x 150 mm 2" X 6"</b>	<b>7</b>
	4.1 Secado de las tabas en horno industrial	7
	4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual	7
	4.3 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) en tablas de 2" X 6" por los métodos de ensayo no destructivos FFT Analyzer y Fakopp	8
	4.4 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) en ensayo de flexión (Máquina Universal) sobre tablas de 2" X 6"	9
	4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Corriente de las tablas ensayadas	10
<b>5.</b>	<b>ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS</b>	<b>10</b>
	5.1 Determinación del Módulo de Elasticidad (MOE) y del Módulo de Rotura (MOR)	10
	5.2 Determinación de la Resistencia al Impacto, ensayo de Flexión Dinámica	11
	5.3 Determinación de la dureza Janka	12
	5.4 Determinación del Contenido de Humedad y Densidad Aparente Corriente	12
<b>6.</b>	<b>RESULTADO Y DISCUSIÓN</b>	<b>13</b>
	6.1 Estudios realizados sobre trozas en estado verde	13
	6.1.1 Clasificación visual	13
	6.1.2 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica	13
	6.1.3 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio	13
	6.1.3.1 Análisis por altura según ubicación en el radio	15
	6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura	15
	6.1.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	16
	6.1.5 Módulo de Elasticidad de las trozas	16
	6.2 Estudios realizados en tablas secas 50 x 150 mm (2 X 6)	19
	6.2.1 Resumen de las propiedades mecánicas en tablas (solo B y C)	19
	6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas	21
	6.2.3 Relación entre la Densidad Corriente y las propiedades mecánicas	22
	6.2.4 Análisis del Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura según ubicación en el radio	23
	6.2.4.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	24
	6.2.5 Análisis del Módulo de Elasticidad y Módulo de Rotura según ubicación en la altura	24
	6.2.5.1 Análisis por ubicación en el radio según altura	24

6.2.6 Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas_____	26
6.2.7 Clasificación de las tablas en categorías estructurales según norma JAS_____	26
6.3 Estudios realizados en pequeñas probetas libres de defectos_____	28
6.3.1 Resumen de las propiedades mecánicas_____	28
6.3.2 Variación de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio_____	29
6.3.3 Variación de las propiedades mecánicas en la altura_____	30
6.3.4 Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en el radio0_____	32
6.3.5 Análisis de las propiedades mecánicas por ubicación en el radio según altura_____	34
6.3.6 Relación entre las distintas propiedades en pequeñas probetas libres de defectos_____	35
6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de la tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos_____	36
6.3.8 Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas o vigas de tamaño real y probetas libres de defectos_____	38
<b>7. BIBLIOGRAFÍA_____</b>	<b>39</b>
Ficha Técnica de Propiedades Físicas y Mecánicas de <i>Pinus elliotii</i> Eng. del Norte de Uruguay_____	40
Índice de Figuras, Cuadros y Gráficos _____	41

## RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus elliottii* Eng. del departamento de Rivera, al norte de Uruguay.

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

A las tablas secas 2" x 6" (50 mm x 150 mm) se les midió el módulo de elasticidad por métodos no-destructivos. Luego se determinó el módulo de rotura mediante ensayo de flexión estática.

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

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

Palabras clave: *Pinus elliottii* Eng., módulo de elasticidad, módulo de rotura, densidad, no destructivo

## SUMMARY

In this report wood mechanical properties of *Pinus elliottii* Eng. grown in Rivera department northern Uruguay were studied.

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

Modulus of elasticity and modulus of rupture (static bending) of kiln dried boards 2" x 6" (50 mm x 150 mm) were calculated.

From the same boards, small clear specimens were tested.

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

Key words: *Pinus elliottii* Eng., modulus of elasticity, modulus of rupture, density, non destructive.

## 1. INTRODUCCIÓN

A los efectos de identificar e implementar los estudios faltantes para facilitar la planificación a nivel nacional y a nivel de los productores, para 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 Dirección General Forestal del MGAP y el LATU. En el año 2004 se integraron a este grupo la Facultad de Agronomía y el INIA.

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* Maiden, *Pinus elliottii* Eng. y *Pinus taeda* L., 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.

Consideramos de gran importancia al conocimiento y a la caracterización de nuestras especies forestales para la obtención de madera de buena calidad. Esta séptima publicación pretende colaborar en este conocimiento de la especie *Pinus elliottii* Eng. implantada en el Uruguay, que en la actualidad ocupa un área de aproximadamente 55.000 has. En este caso analizaremos la madera de un rodal del norte de nuestro país, más precisamente del departamento de Rivera, de 23 años de edad.

## 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 julio del 2003.

Dentro de este rodal, se seleccionaron 25 árboles divididos en tres clases diamétricas (9, 7 y 9 árboles por clase). La selección de los árboles se realizó por diámetro, poca conicidad, rectitud del fuste, sanidad y hábito de ramas (distribución de las ramas, altura, etc).

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 25) 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: Parte de las trozas muestreadas.**

El siguiente cuadro muestra las características de los ejemplares seleccionados:

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

Clases diamétricas		Número de	DAP c/c	Altura (m)		
Clase	Rango (cm)	Individuos	Medio (cm)	Total	Ø = 15 cm	1° rama viva
1	32 – 39	9	36,6	25,7	19,9	9,9
2	40 – 42	7	41,5	25,3	20,8	8,3
3	> 42	9	47,2	25,9	20,8	9,5

## **2.2 Características de el rodal muestreado**

### **2.2.1 Datos técnicos del rodal**

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

<b>Especie</b>	<b><i>Pinus Elliottii</i> Eng.</b>
<b>Localidad / Departamento</b>	<b>La Aurora / Rivera</b>
<b>Año de Plantación</b>	<b>1980</b>
<b>Origen de la semilla</b>	<b>South Africa</b>
<b>Densidad de plantación ( árboles / hectárea )</b>	<b>1000</b>
<b>Tipo de suelos C.O.N.E.A.T.</b>	<b>7</b>

## 2.2.2 Tratamientos silviculturales (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	4	1	Todos
2	6	3	Todos
3	8	5	Todos

**Cuadro N° 4: Raleos realizados.**

Raleos		
Número	Edad (años)	Densidad remanente (árb./ha)
1	9	700
2	12	450
3	15	250
4	20	150

## 3. ENSAYOS EN LAS TROZAS

Sobre las 75 trozas verdes se realizaron en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU los ensayos que se presentan a continuación:

- **Inspección visual de las trozas.**
- **Descortezado.**
- **Determinación del contenido de humedad.**
- **Determinación de la densidad aparente básica.**
- **Estimación del módulo de elasticidad por métodos no destructivos.**
- **Aserrado para obtención de tablas o vigas 50 x 150 mm (2" x 6").**

### 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:

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

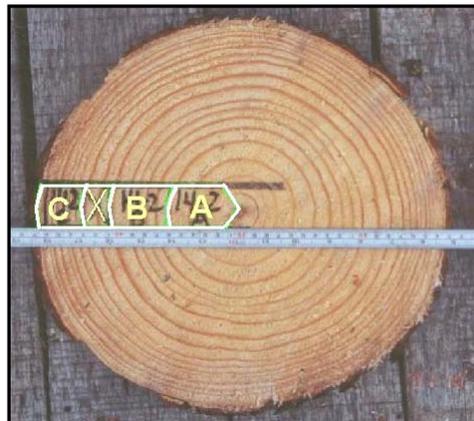
### 3.2 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Aparente Básica.

Una vez finalizada la clasificación visual, se cortaron las trozas a 3 m de longitud. Del metro superior restante (o top end) se extrajo una rodaja de aproximadamente 5 cm de espesor para determinar la de densidad aparente básica y el contenido de humedad. Esta se identificó y se le dibujó en forma radial la ubicación de las probetas para el contenido de humedad y la densidad. Se fotografiaron con una regla milimetrada sobre ellas para poder usarla como referencia para medir la distancia del centro de las probetas a la médula.

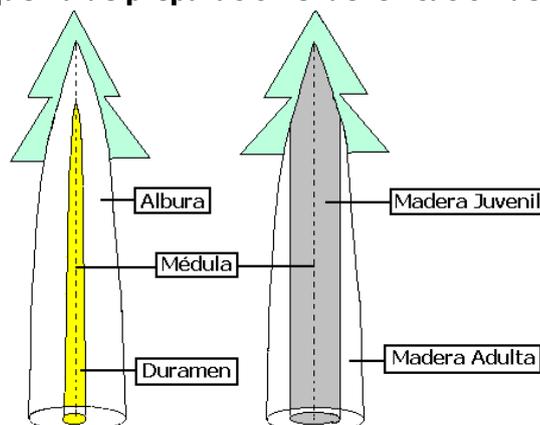
Se extrajeron tres probetas por rodaja dispuestas en forma lineal y radial entre la médula y la corteza. A las mismas se las llamo "A", "B" y "C" siendo la probeta "A" la próxima a la médula, "B" la ubicada en una zona intermedia y la "C" la próxima a la corteza (Ver figura N° 2).

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 nos permitió 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 aparente básica, etc. Debemos mencionar también que no es lo mismo duramen que madera juvenil, en la figura N° 3 vemos las distintas proporciones de madera juvenil, madera adulta, duramen y de albura en pinos provenientes de plantaciones de rápido crecimiento.



**Figura N° 2: Esquema de preparación e identificación de las probetas.**



**Figura N° 3: 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 saturarlas, 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  $103 \pm 2$  ° C. hasta llegar a estado anhidro (peso anhidro).

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

Las fórmulas para los cálculos fueron las siguientes:

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

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

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

<b><math>D_{basica}</math></b> :	Densidad aparente básica (g/cm <sup>3</sup> )
<b><math>V_V</math></b> :	Volumen verde
<b><math>P_{Anh}</math></b> :	Peso anhidro
<b><math>P_{sat}</math></b> :	Peso húmedo
<b><math>P_{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 (Rápida Transformada de Fourier). Este es un equipo que analiza el sonido producido por el impacto de un martillo en un extremo de la troza, que luego de atravesarla 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, en el diámetro mayor y en el diámetro menor para obtener el volumen y con el peso determinar la densidad.

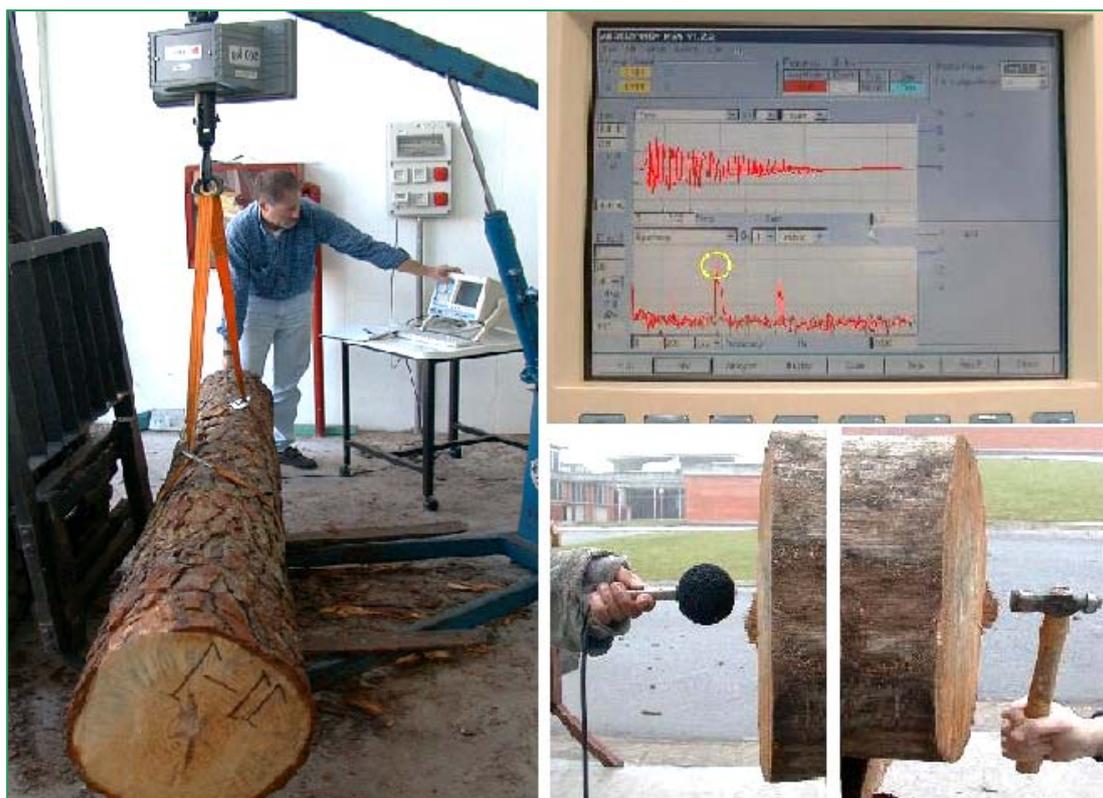
A partir de la frecuencia obtenida se calcula el Módulo de elasticidad mediante la siguiente fórmula:

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

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

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

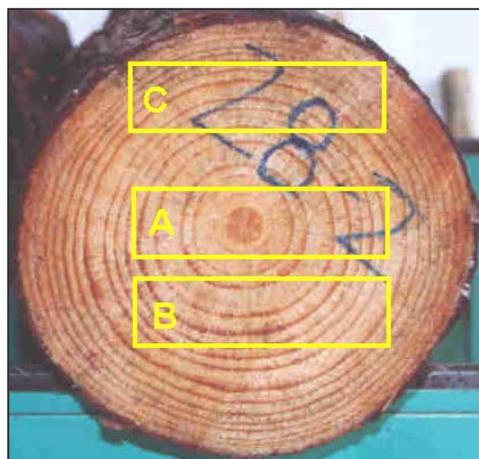
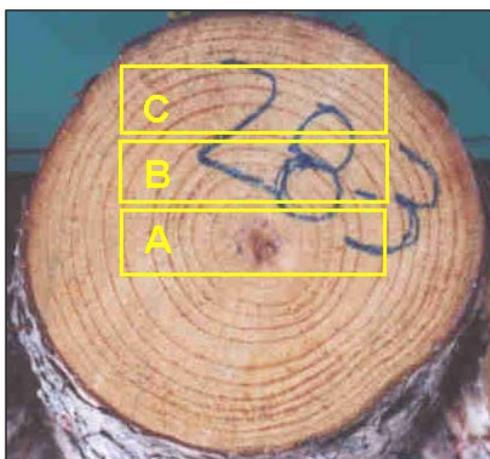
Finalizado el ensayo de las trozas, se procedió a descortezar y ensayar nuevamente a alguna de ellas, de forma de estimar los valores del MOE sin corteza y poder correlacionarlos con los valores de MOE con corteza.



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

### **3.4 Aserrado de las trozas para obtención de las tablas 50 x 150 mm (2"X 6")**

Las trozas fueron aserradas en el Departamento de Proyectos Forestales del LATU, obteniendo de cada una de ellas tres tablas o vigas 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° 5 y 6.



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



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

#### **4. ENSAYOS MECÁNICOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS EN TABLAS 50 x 150 mm (2"X 6")**

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

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

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

Para el secado de las tablas obtenidas en el aserrado de las trozas muestreadas, se contó con la colaboración de la empresa Industrias Forestales Arazatí S.A, en cuyos hornos de secado se llevó la madera a un contenido de humedad final promedio de 10,9 %. Luego del secado se controló el contenido de humedad mediante un xilohigrómetro de resistencia y se comprobó dicho contenido de humedad mediante pequeñas probetas obtenidas de los extremos de las tablas, una vez que estas son ajustadas a su longitud final de ensayo 2,80 m.

##### **4.2 Dimensionado de las tablas e inspección visual**

Las tablas luego del secado fueron cepilladas y escuadradas llevándolas a las dimensiones finales de ensayo 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 representan 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 los métodos de ensayo no destructivos FFT Analyzer y Fakopp**

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

La fórmula utilizada fue la siguiente:

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

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



**Figura N° 9: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer.**

También se utilizó para estimar el módulo de elasticidad por métodos no destructivos el equipo Fakopp de origen húngaro, que mide el tiempo de propagación de una onda o sonido inducido por el impacto de un martillo, en recorrer determinada distancia entre dos transductores. Para determinar la densidad también se utilizaron las dimensiones para determinar el volumen. Para el cálculo del MOE se utilizó la siguiente fórmula:

$$L/t-sw = (E_{t-sw} \cdot g / \rho)^{1/2}$$

**$E_{t-sw}$**  : MOE por propagación de onda de impacto  
 **$L$**  : Largo de la tabla  
 **$t-sw$**  : Tiempo de propagación de la onda por unidad de distancia recorrida  
 **$g$**  : Constante de aceleración gravitacional  
 **$\rho$**  : Densidad corriente de la madera (peso corriente/ volumen corriente)

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

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

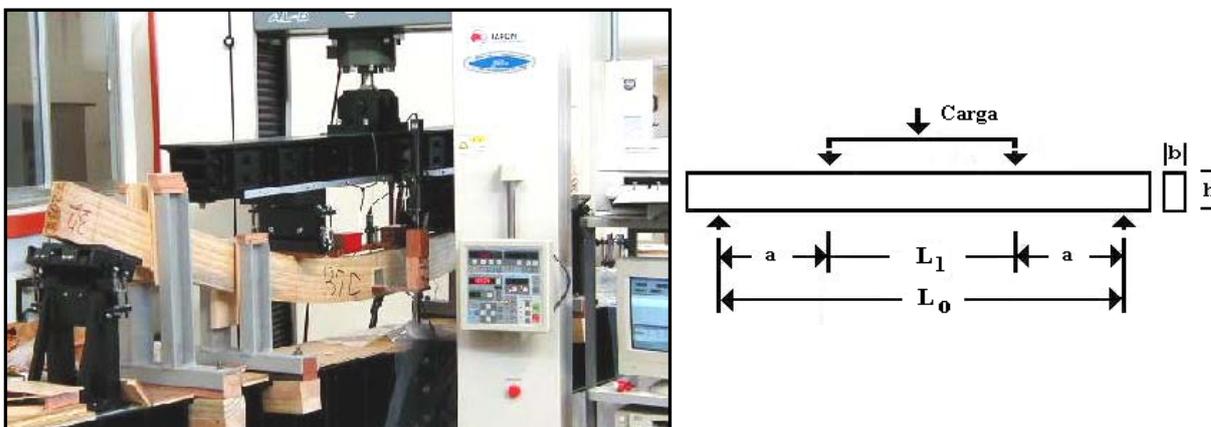


Figura N° 10. Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal.

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

El Módulo de Elasticidad y el Módulo de Rotura fueron determinados 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:

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

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

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

**$\Delta P$** : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.  
 **$L_0$** : Distancia entre apoyos inferiores (span)  
 **$L_1$** : Distancia entre apoyos superiores de carga  
 **$I$** : Momento de Inercia  
 **$\Delta y$** : 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 fotografiaron las tablas para tener un registro de la forma y el lugar en que se produjo la falla o rotura, estas sirven como respaldo y para relacionar estos con la resistencia mecánica.

#### **4.5 Determinación del Contenido de Humedad y la Densidad Apparente 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  $103 \pm 2^\circ \text{C}$  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:

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

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

**$D_{\text{corriente}}$**  : Densidad aparente corriente (g/cm<sup>3</sup>)

**$V_{\text{corriente}}$**  : Volumen a 10,9% CH

**$P_{\text{Anh}}$**  : Peso anhidro (g)

**$P_{\text{corriente}}$**  : 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 10,9 % CH promedio para las tablas y a 10,7% CH promedio para las pequeñas probetas libres de defectos.

### **5. ENSAYOS MECÁNICOS EN PEQUEÑAS PROBETAS LIBRES DE DEFECTOS**

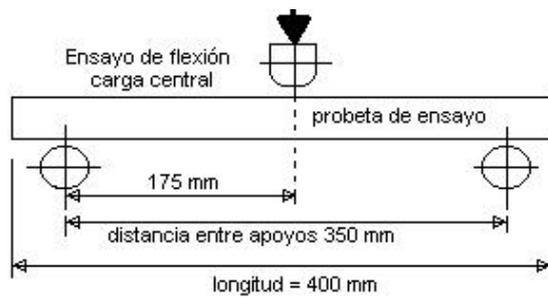
A partir de las partes no afectadas de tablas o vigas de 2" x 6" ensayadas en flexión estática, se confeccionaron pequeñas probetas libres de defectos, con una correcta orientación de los anillos de crecimiento respecto a las caras radiales (perpendiculares) y tangenciales (paralelos). Todas las probetas 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)**

Se determinó el módulo de elasticidad y el módulo de rotura en ensayo de flexión estática, 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 entre 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° 11: 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

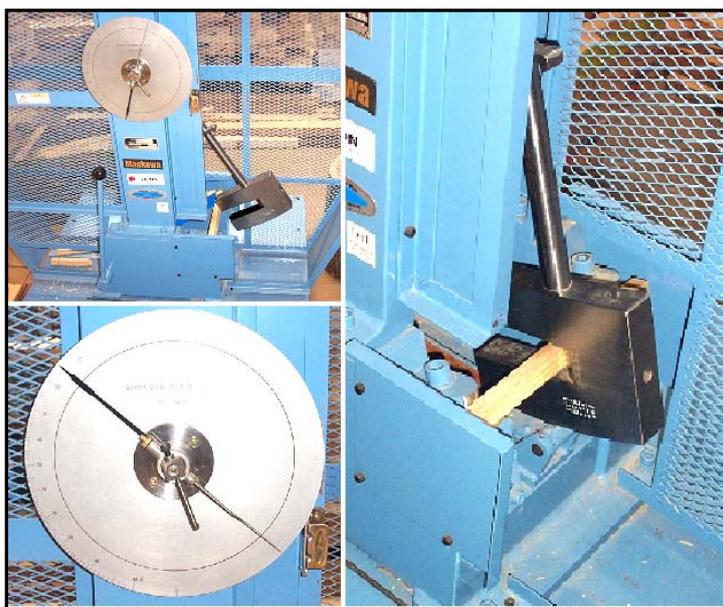
El ensayo de flexión dinámica se realizó sobre probetas de 300 x 20 x 20 mm en péndulo Maekawa con una energía de 98 J. El impacto se produjo en el centro de la probeta, con orientación sobre la cara radial.

La norma utilizada fue la JIS (Japanese Industrial Standard) Z2116 "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° 12: 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° 13)



**Figura N° 13: Ensayo de dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio.**

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

Una vez finalizados los ensayos en pequeñas probetas, se determinó el contenido de humedad y la densidad 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° 5 se muestra, para cada tipo de troza el porcentaje de las mismas que pertenecen a cada categoría. El criterio de clasificación está descrito en el capítulo 3.1.

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

	CATEGORÍA			
	I	II	III	IV
<b>Troza 1</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Troza 2</b>	<b>4</b>	<b>44</b>	<b>44</b>	<b>8</b>
<b>Troza 3</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>40</b>	<b>56</b>

Recordemos que los árboles fueron podados a 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 existen solo trozas de categorías I y II, en segundas trozas predomina la categoría II y III y en menor grado la categoría IV, y en las terceras trozas (no podadas) predominan las trozas de las categorías III y IV.

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

El contenido de humedad promedio de las trozas fue de 142,3%, 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.

La densidad básica promedio fue de 0,396 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° 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica**

	Contenido de Humedad ( % )	Densidad Apa. Básica ( g/cm <sup>3</sup> )
Número	195	195
<b>Promedio</b>	<b>142,3</b>	<b>0,396</b>
Máximo	210,9	0,566
Mínimo	69,8	0,303
STD	32,4	0,059
CV %	22,8	15,0

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

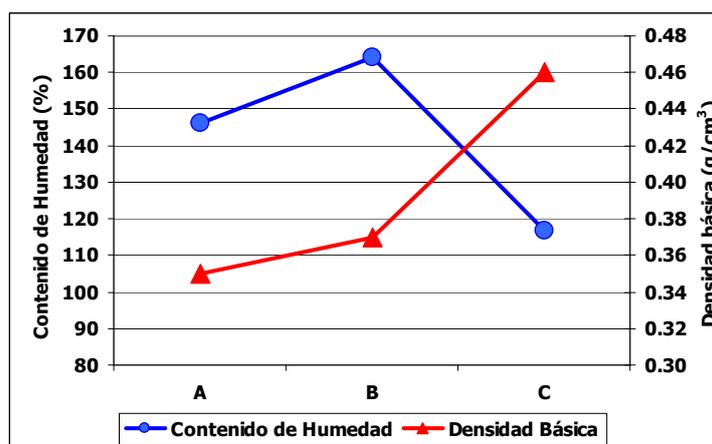
Para el contenido de humedad y la densidad básica se encontró un patrón de variación en el radio y en altura. En el radio, el contenido de humedad aumenta desde una ubicación próxima a la médula (probetas "A") hasta la zona central (probetas "B") disminuyendo luego más cerca de la corteza (probetas "C"). 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 de las ubicaciones o zonas "B" y "C" logrando luego mayor homogeneidad de los procesos. Ver Cuadro N° 7.

La densidad básica en este estudio disminuye desde la médula hacia la corteza. Estos comportamientos se pueden ver con claridad en el gráfico N° 1.

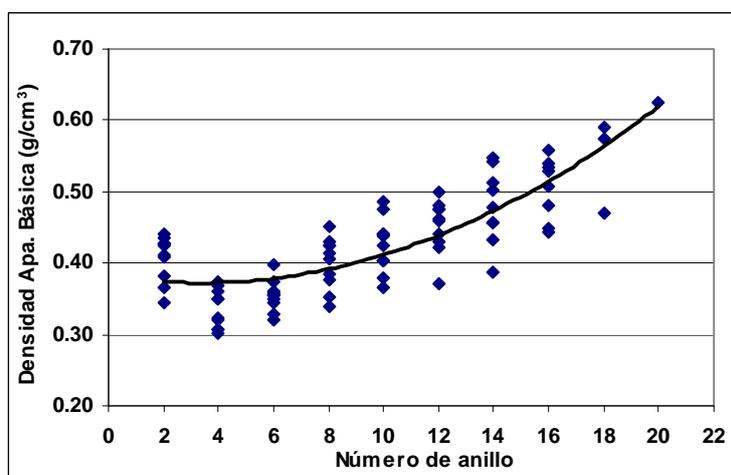
**Cuadro N° 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio**

Probeta	N°	Humedad (%)			Densidad Apa. Básica (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
A	75	144	27,2	19,1	0,354	0,026	7,2
B	75	164	22,6	14,0	0,376	0,032	8,6
C	75	115	23,1	20,2	0,464	0,047	10,2
<b>Promedio</b>		<b>141</b>		<b>17,8</b>	<b>0,398</b>		<b>8,7</b>



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

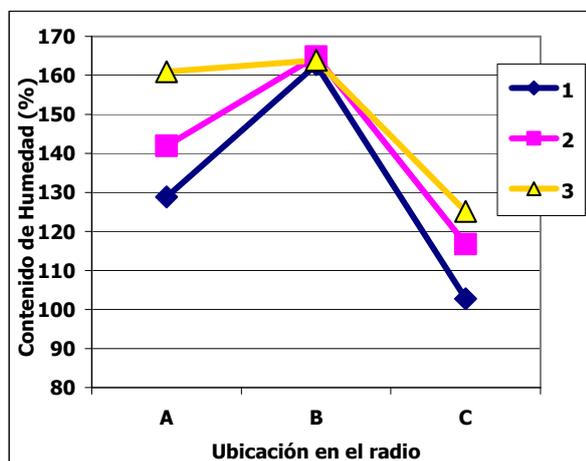
Normalmente la densidad cerca de la médula presenta valores mas bajos que la madera cercana a la corteza. En este trabajo a diferencia de lo observado en el Informe N° 1 "Propiedades Mecánicas de *Pinus Elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay", se cumple con lo esperable. La densidad aumenta con la edad 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.



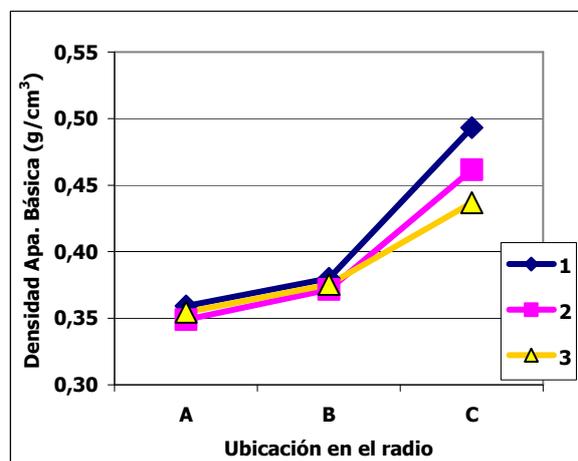
**Gráfico N° 2: Densidad Aparente Básica según anillo medio de la probeta**

### 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 el promedio, desplazándose hacia arriba o hacia abajo en el gráfico según de que altura se trate. Estas diferencias entre alturas están dadas básicamente por la distinta proporción de albura y por la distinta relación madera juvenil / madera adulta, que encontramos en las distintas alturas.



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



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

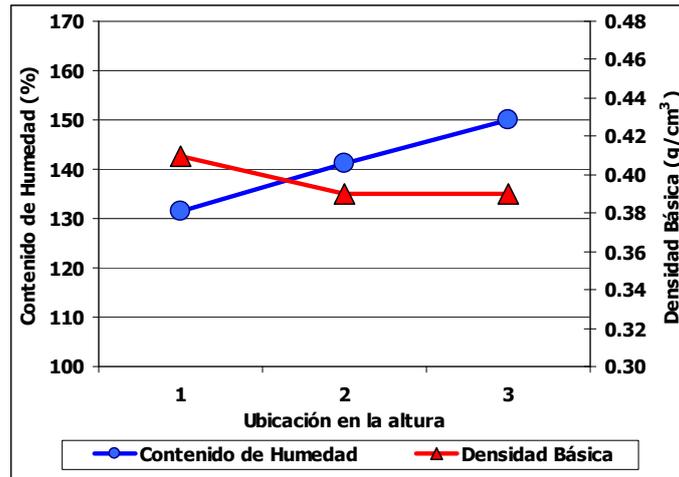
### 6.1.4 Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura

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

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

Troza	N°	Humedad (%)			Densidad Apa. Básica (g/cm <sup>3</sup> )		
		Media	Desv std	CV %	Media	Desv std	CV %
1	75	131	22,9	18,1	0,411	0,036	8,6
2	75	141	26,5	19,1	0,394	0,038	9,3
3	75	150	23,9	16,1	0,389	0,032	8,2
<b>Promedio</b>		<b>141</b>		<b>17,8</b>	<b>0,398</b>		<b>8,7</b>

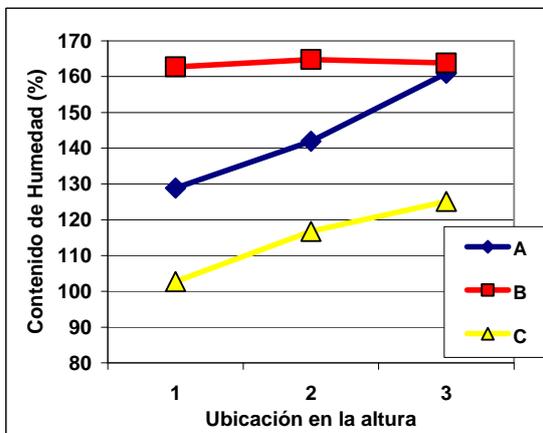
En la primer troza existe cierta duraminización de la madera y una menor proporción de madera juvenil que en el resto de las trozas. Estas dos características hacen que el contenido de humedad se mantenga bajo y la menor proporción de madera juvenil hace que la densidad sea mayor que en las otras trozas. En contraposición la tercer troza posee poco 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.



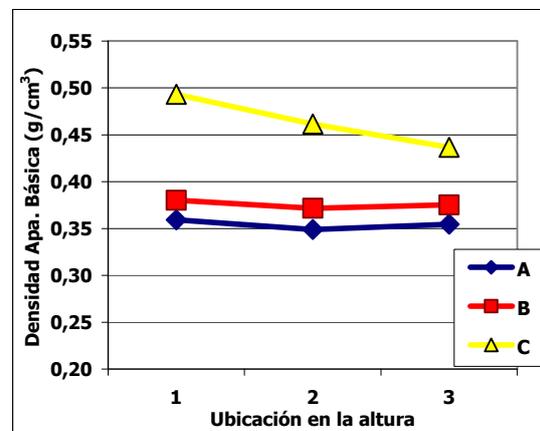
**Gráfico N° 5: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura**

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

Para ambas propiedades, el análisis por altura para cada una de las probetas (A, B y C) mostró que la tendencia de la variación en altura es igual para todas las ubicaciones en el radio, variando solo el valor absoluto de la propiedad para cada caso. La densidad aumenta a medida de que nos alejamos de la médula, en el estudio anterior de *Pinus elliottii* (Informe N° 1) las probetas "A" presentaban valores mas altos que las probetas "B" seguramente por el alto contenido de resina.



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

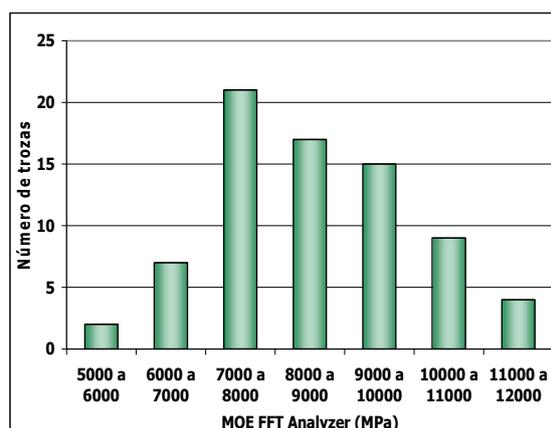
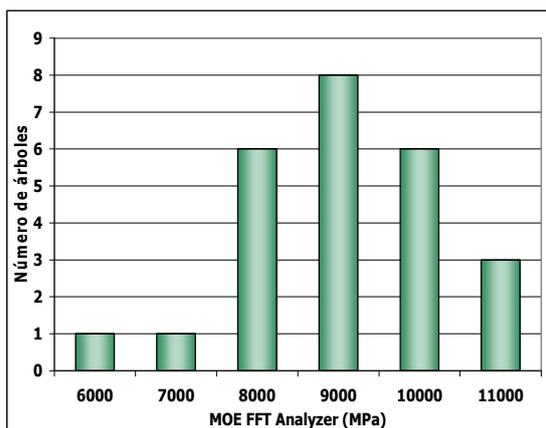


**Gráfico N°7: Densidad Aparente Básica por probeta según ubicación en altura**

#### 6.1.5. Módulo de Elasticidad de las trozas

El MOE promedio de las trozas analizadas (25 de cada altura) es de 8577 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.



**Gráficos N° 8: Variación de los valores de MOE entre árboles y entre trozas**

Existió un patrón de variación para las trozas dentro de un mismo árbol. El valor más alto se encuentra en la segunda troza siendo menores en la primera y tercera troza. Pensamos que se debe, 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.

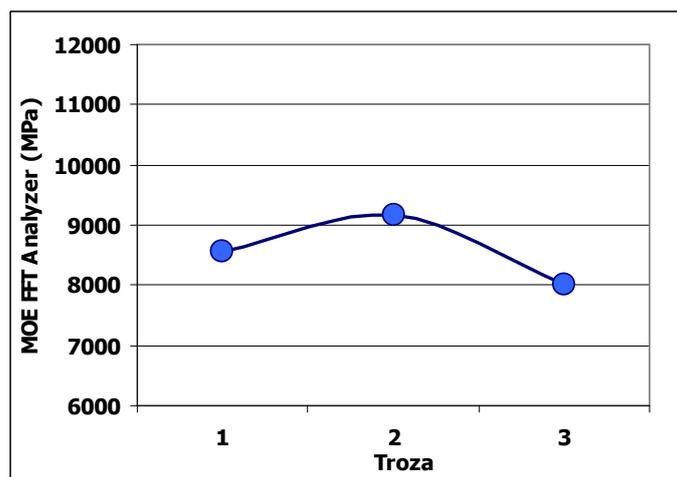
**Cuadro N° 9: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza**

Árbol N°	MOE Trozas con corteza (MPa)			Media (MPa)
	1	2	3	
<b>Media</b>	<b>8554</b>	<b>9178</b>	<b>8000</b>	<b>8577</b>
<b>Máximo.</b>	11863	11890	10070	10686
<b>Mínimo.</b>	5427	6618	5819	5955
<b>Desv std.</b>	1481	1323	1128	1185
<b>CV (%)</b>	17,3	14,4	14,1	13,8

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, Informe N° 1, Octubre 2002) la correlación entre el MOE de las trozas con corteza y una vez descortezadas fue alta (en gráfico N° 10, un  $r = 0,937$ ) 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 75 trozas con corteza (25 primeras trozas, 25 segundas trozas y 25 terceras trozas).

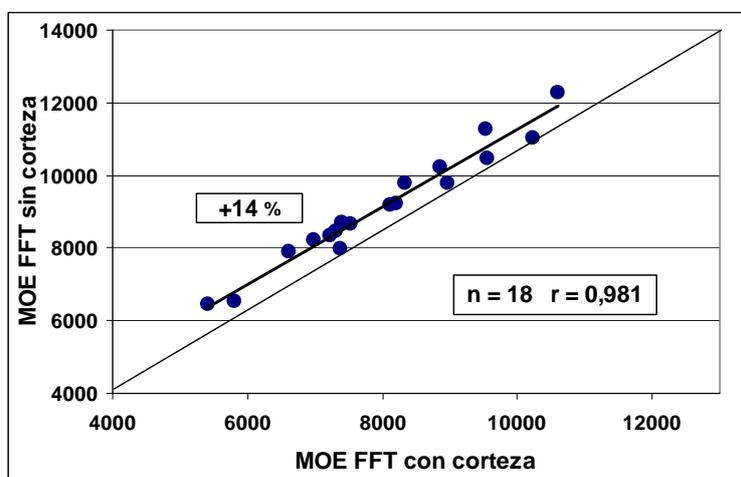


**Gráfico N° 9: Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas con corteza según la posición en altura**

En el cuadro N° 10 y en el gráfico N° 10 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 14,1 % superior. Este comparativo se realizó sobre 18 trozas provenientes de 6 árboles 3 trozas de cada uno.

**Cuadro N°10: MOE promedio con y sin corteza**

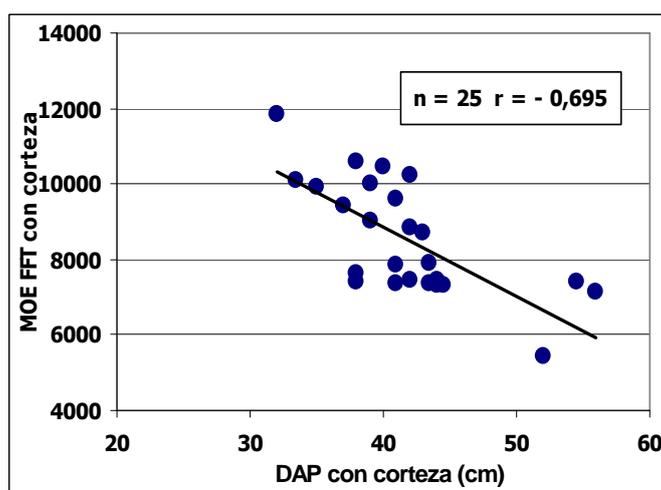
FFT Analyzer	Con Corteza	Sin Corteza
MOE Promedio (MPa)	8007	9136



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

No se encontró relación muy alta 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 totalmente de la velocidad de crecimiento ( $r = -0,695$ ) ver gráfico N° 11.

En el estudio realizado en *Pinus elliottii* de Río Negro se observó que no existía 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 50 x 150 mm (2"x 6")

Los estudios realizados en tablas secas dimensionadas (50mm x 150mm x 2.8 m) fueron divididos en dos tipos, ensayos mecánicos no destructivos y ensayos mecánicos destructivos. Como ensayo no destructivos se realizó la determinación del MOE por el método de la principal frecuencia de vibración mediante el equipo FFT Analyzer, a todas las tablas o vigas y el Fakopp (velocidad de propagación del sonido inducido mediante el golpe de un martillo) en 46 tablas. 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 (Industrias Forestales Arazatí S.A), se les estimó el contenido de humedad mediante xilohigrometro de resistencia y el valor promedio fue de 10,9 %, posteriormente fueron cepilladas y escuadradas, llevadas a las dimensiones finales de ensayo. Luego de realizado el ensayo de flexión estática se determinó el contenido de humedad de todas las tablas y el valor promedio fue de 10,7%.

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

En el cuadro N° 11 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° 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C)**

	<b>MOE FFT Analyzer (MPa)</b>	<b>MOE Fakopp (MPa)</b>	<b>MOE Máq. Universal (MPa)</b>	<b>MOR Máq. Universal (MPa)</b>	<b>Densidad Apa. Corriente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Número	172	46	172	169	172
<b>Promedio</b>	<b>6725</b>	<b>10347</b>	<b>6721</b>	<b>40.8</b>	<b>0,462</b>
Máximo	14481	13974	15260	85,2	0,583
Mínimo	4283	7164	4076	10,5	0,384
STD	2157	1732	2534	20,4	0,049
CV %	32,1	16,7	37,7	49,9	10,7

En el cuadro anterior (Cuadro N° 11) se puede ver que los valores mínimos tanto para el MOE como para el MOR son bajos comparados con los valores medios. 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 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. Debemos tener en cuenta también la influencia de la mayor o menor presencia de madera juvenil en los valores de resistencia.

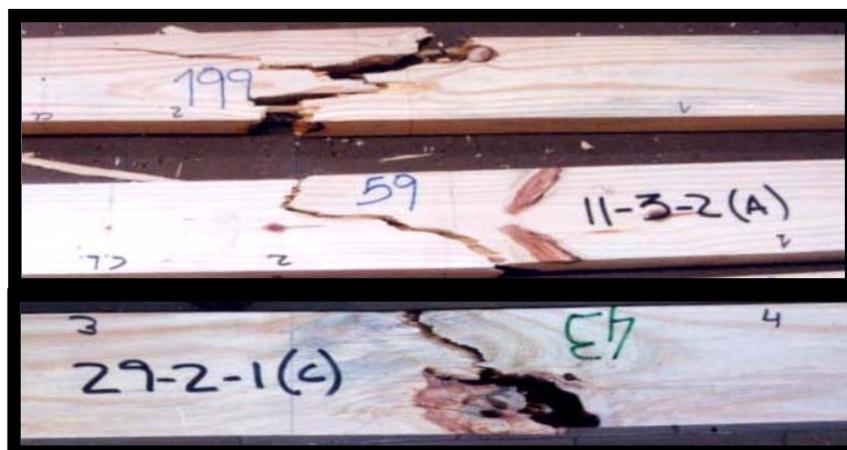
Si descartamos las terceras trozas para el uso estructural en base a lo fundamentado anteriormente, los promedios y otros parámetros estadísticos obtenidos son los que se muestran en el siguiente cuadro N° 13.

**Cuadro N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas "B" y "C" de la 1° y 2° troza**

	<b>MOE FFT Analyzer (MPa)</b>	<b>MOE Máq. Universal (MPa)</b>	<b>MOR Máq. Universal (MPa)</b>	<b>Densidad Apa. Corriente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
número	122	120	120	122
<b>Promedio</b>	<b>8566</b>	<b>8396</b>	<b>45,3</b>	<b>0,488</b>
Máximo	14481	15260	85,2	0,583
Mínimo	4283	4133	11,6	0,384
STD	2260	2629	20	0,052
CV %	26,4	31,3	45,1	10,7

Observamos que tanto en el cuadro N° 12 como en el N° 13 que los valores mínimos de MOR son bajos 10,5 y 11,6 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 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 ubicaciones "B" y "C", en general estas últimas presentan valores muy superiores al de las tablas.



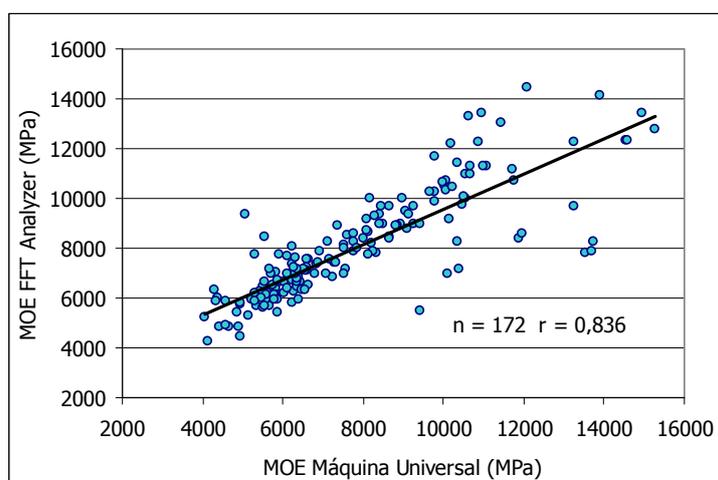
**Figura N° 14: Tipo de la rotura por tensión y por corte en área nudosa**

En la figura N° 14, 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.

### 6.2.2 Relación entre las distintas propiedades mecánicas

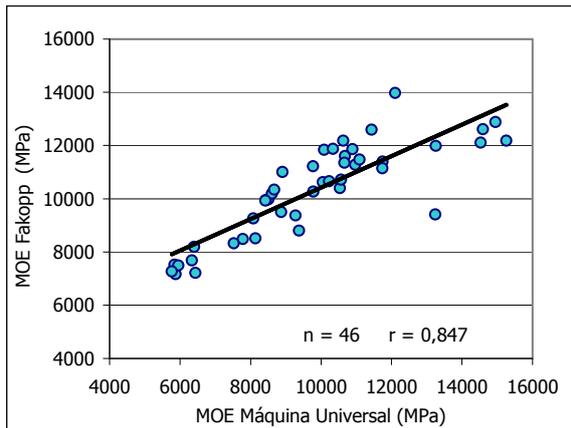
Se realizó la comparación entre los valores de Módulo de Elasticidad obtenidos mediante ensayos no destructivos (FFT Analyzer) y destructivos en ensayo de flexión estática (Máquina Universal). Se observó una buena correlación entre ambos ( $r = 0,836$ ), validando una vez mas el uso del FFT Analyzer como herramienta para la estimación del MOE. Esto se puede observar en el gráfico N° 12.

En trabajos anteriores observamos también una alta correlación que existente 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., los valores de MOE obtenidos mediante estos equipos son superiores a los obtenidos en ensayo de flexión estática en máquina universal.

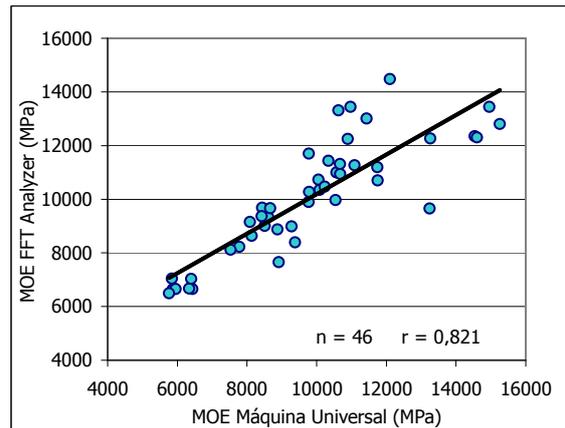


**Gráfico N° 12: Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)**

Se estudio también la relación entre los valores de MOE obtenidos en máquina universal en ensayo de flexión estática y los obtenidos mediante los métodos no destructivos por velocidad de propagación del sonido (fakopp) y por la principal vibración longitudinal (FFT Analyzer) en las tablas o vigas de la ubicación "C", que al ser las ubicadas mas cerca de la corteza son las que se pueden ensayar en los árboles en pie. Se observó que existe relación entre los métodos ( $r = 0,847$  y  $r = 0,821$  respectivamente), ver cuadros Nros. 13 y 14.

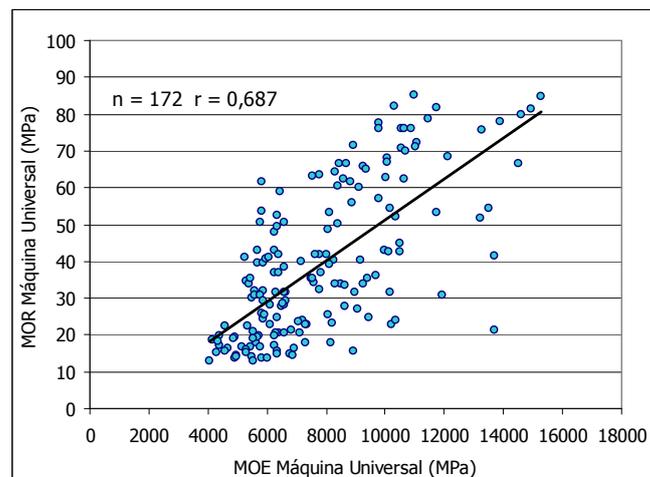


**Gráfico N° 13: Relación entre el MOE Fakopp y el MOE Máquina universal de las tablas "C"**



**Gráfico N° 14: Relación entre el MOE FFT Analyzer y el MOE Máquina universal de las tablas "C"**

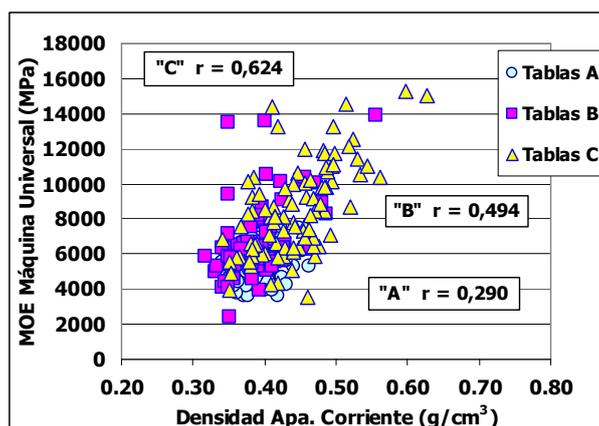
En las tablas se encontró una correlación media entre el MOE y el MOR ( $r = 0,687$ ), esto se debe a que el MOR está muy influido por los defectos de la madera como los nudos, cosa que no sucede con el MOE, el cual está más influenciado por características intrínsecas de la madera y también por la edad cambial.



**Gráfico N° 15: Relación entre el MOR y el MOE en tablas**

### 6.2.3 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 y al igual que en estudios anteriores no se encontró una correlación significativa, en el caso de las tablas "A" ( $r = 0,290$ ), hubo una mayor correlación en los valores de las tablas "B" ( $r = 0,494$ ) y más alta en las tablas "C" ( $r = 0,624$ ) como muestra el gráfico N° 16. Existe para un mismo valor de densidad una muy amplia dispersión de los valores en ambas propiedades mecánicas.



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

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

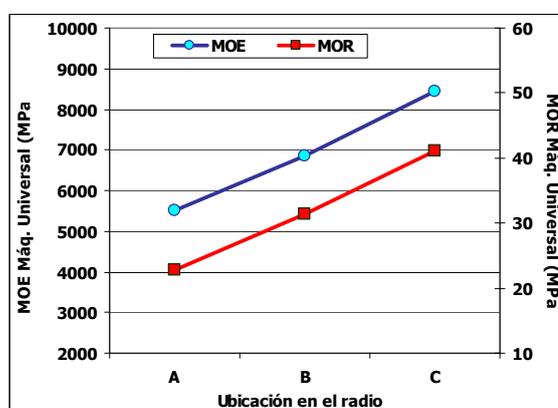
La variación de las propiedades mecánicas y la densidad en el radio muestran una tendencia clara. Todas las propiedades de la madera aumentan a medida que está se aleja de la médula y se acerca a la corteza, salvo en el caso del MOE obtenido mediante el FFT Analyzer, que presentan en las probetas "B" los valores promedio mas altos. En general la madera juvenil presenta 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 al no tener valores superiores al límite de 7850 (MPa).

**Cuadro N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio**

Ubicación de la tabla	Número De tablas	MOE FFT Analyzer (MPa)	MOE Máquina Universal (MPa)	MOR (MPa)	Densidad Apa. Corriente (g/cm <sup>3</sup> )
A	74	6928	5509	22,7	0,392
B	89	7321	6866	31,3	0,394
C	86	6792	8456	41,1	0,435

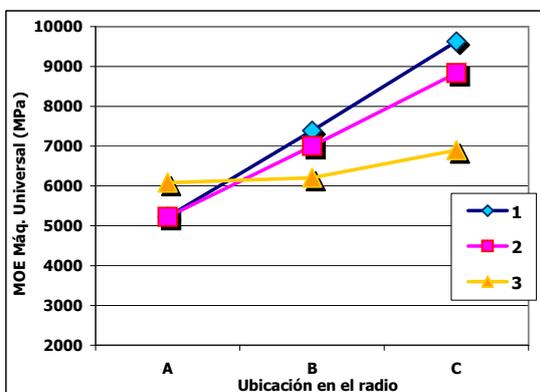
En el grafico N° 17, podemos observar claramente la tendencia de los valores tanto de MOE como de MOR, que aumentan linealmente a medida que nos acercamos a la corteza, esto se observó también en los estudios realizados anteriormente en *Pinus elliotii* y *Pinus taeda*.



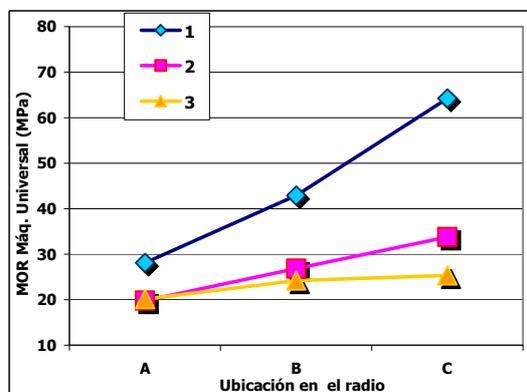
**Gráfico N° 17: Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio**

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

Analizando la variación en el radio de las propiedades para las distintas alturas por separado, observamos que el comportamiento es muy similar para todas las alturas e igual al promedio. Para las tres alturas los valores de las tablas "C" son superiores o dicho en otras palabras cuanto menor es la proporción de madera juvenil, 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**

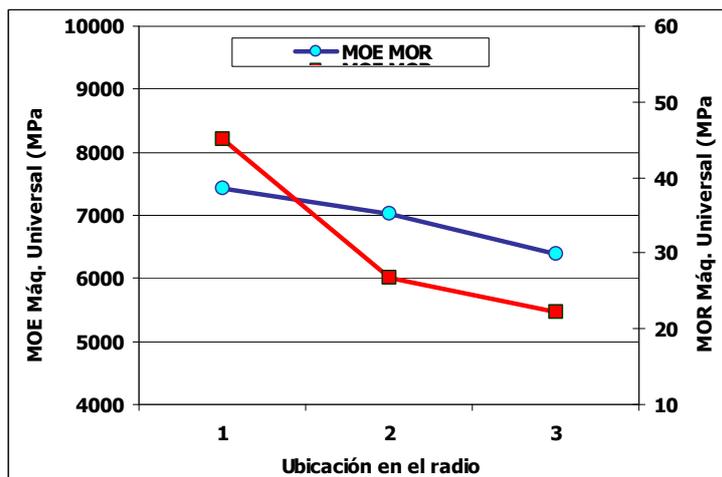
Se observa que los valores promedio de MOR (gráfica N° 19) vemos que los valores promedio de las tablas de las segundas y terceras trozas en las ubicaciones "A y B" distanciándose en la ubicación "C". Se observa también que los valores promedio de las tablas de las primeras trozas en todas las ubicaciones son sensiblemente superiores a los de las segundas y terceras alturas, seguramente es debido a efecto de la poda en la ausencia de defectos en la madera y a que cuanto más abajo están ubicadas las tablas, tienen mas proporción de madera de mayor edad, o con menor proporción de madera juvenil.

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

Los valores promedio para las dos propiedades presentan las mismas tendencias, el MOE y el MOR disminuyen a medida que aumenta en altura la ubicación de la madera. En los valores promedio del MOE no destructivo FFT Analyzer, se observa que en la segunda troza son menores, siendo más altos también en la tercer trozas. Con la densidad aparente corriente ocurre algo similar, los valores promedio más altos están en la tablas de la primer troza, solo que las diferencias entre las alturas no son tan marcadas como lo son en las otras propiedades.

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

Altura	Número De tablas	MOE	MOE	MOR	Densidad Apa.
		FFT Analyzer	Máq. Universal		Corriente
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(g/cm <sup>3</sup> )
1	102	7172	7413	45,1	0,432
2	76	6550	7022	26,8	0,395
3	71	7319	6396	22,2	0,394

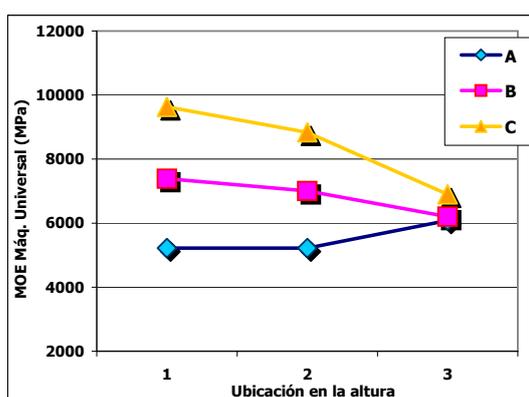


**Gráfico N° 20: MOE y MOR según ubicación en altura**

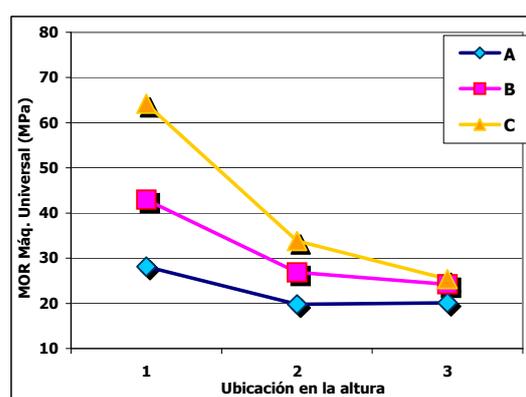
### 6.2.5.1. Análisis por ubicación en el radio según altura

Analizando la variación en altura para cada una de las ubicaciones en el radio, observamos un comportamiento similar al promedio. La tendencia general en las especies de pinos estudiadas (*P. taeda* y *P. elliottii*) es que las propiedades mecánicas disminuyen a medida que aumenta la altura. Este comportamiento no es tan claro en el caso del MOE para las tablas en la ubicación "A" en las que los valores aumentan en la tercer altura, ver gráfico N° 21.

En el caso del MOR los valores disminuyen a medida que avanzamos en la altura, manteniendo las probetas "A" los valores más bajos seguidas de las "B" y luego las "C" con los valores mas altos. Podemos ver que en la tercer troza (al igual que en estudios anteriores) la tendencia de los valores promedio de MOR para los tres tipos de probetas es muy similar (Gráfico N° 22). Las tablas "C" como era de esperar presento valores promedio significativamente superiores en la primer troza, superiores pero tan significativamente en la segunda trozas y en la tercer trozas muy similar a las dos ubicaciones restantes.



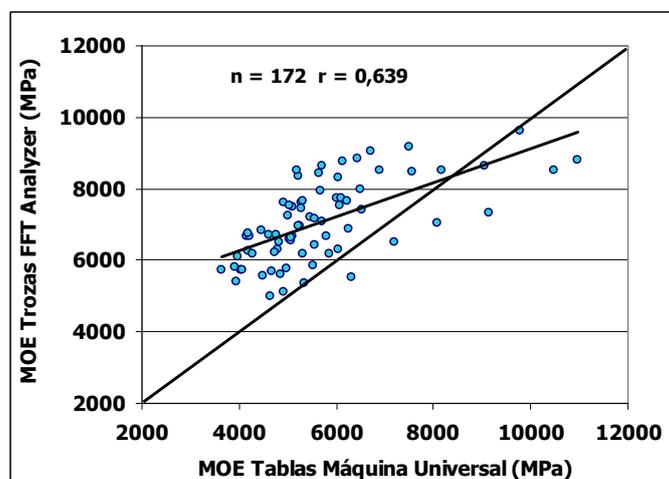
**Gráfico N° 21: MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura**



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

### 6.2.6 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 elliotii* Eng. estudiado y los resultados publicados en "Propiedades Mecánicas de *Pinus elliotii* Eng. del Litoral del Uruguay, (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino "GT3", Informe N° 1, Octubre 2002) sí se observó una relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas de estas trozas ( $r = 0,639$ ), recordemos que para *Pinus elliotii* fue ( $r = 0,353$ ) y ( $r = 0,78$  y  $r = 0,74$  para la primera y la segunda troza respectivamente), en el estudio realizado en *Pinus Taeda* "Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral del Uruguay, (Grupo Técnico de Madera Aserrada de Pino "GT3", Informe N° 2, Junio 2003) esta relación fue de un  $r = 0,664$ .

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

En los siguientes cuadros N° 15 y N° 16 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 elliotii* que nos ocupa en este estudio, el 28,4 % 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 28,5 % de del total de las tablas, que no calificarían para uso estructural y menores aun un 43,1 %.

Es importante precisar que la categorización de las tablas se realizó en base a los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo de Flexión Estática en máquina universal y hemos observado en este trabajo y en otros realizados en pinos que existe una diferencia entre los valores promedio de MOE obtenidos mediante los métodos no destructivos (FFT Analyzer, Faklopp, Sylvatest) superior entre 10 y 15 % al los valores de MOE obtenidos mediante el ensayo en máquina universal, método que consideramos de referencia. De lo anterior concluimos que para realizar la misma clasificación o evaluación en base a el MOE obtenido mediante métodos no destructivos debemos tener en cuenta esta diferencia.

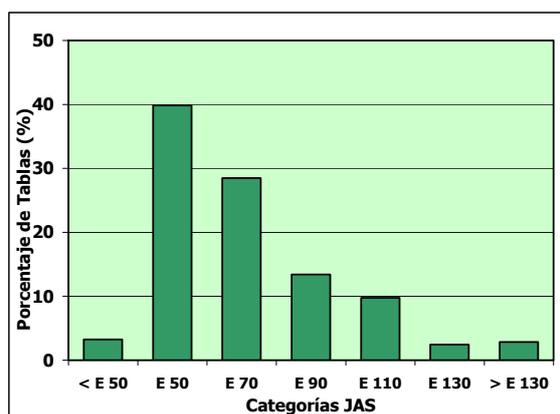
**Cuadro N° 15: Porcentaje de tablas según categoría JAS**

Categoría JAS	MOE 10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	MOE Máquina Universal ( MPa )	Promedio Tablas	
			Cantidad (246)	Porcentaje (%)
< E 50	< 40	< 3920	8	3,3
E 50	40-60	3920-5880	98	39,8
E 70	60-80	5880-7850	70	28,5
E 90	80-100	7850-9810	33	13,4
E 110	100-120	9810-11770	24	9,8
E 130	120-140	11770-13730	6	2,4
> E 130	> 140	> 13730	7	2,8

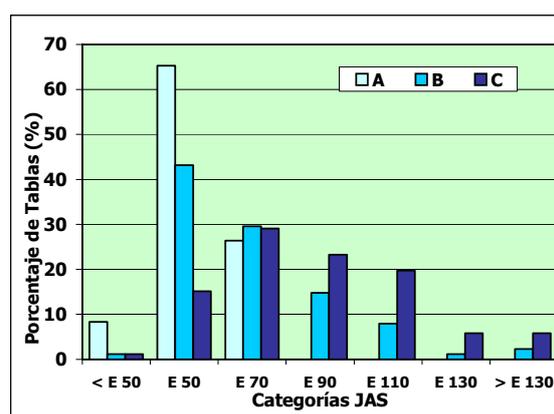
En el gráfico N° 25 y en el cuadro N° 15 representamos la distribución de los valores de MOE de las tablas, donde observamos que en los rangos E 50 y E 70 se concentra casi el 70 % de las tablas ensayadas, donde ninguna de las tablas "A" es apta para utilizarse como madera estructural, solo el 26,1 % de las tablas "B" si lo son y un 54,7 % de las tablas "C" son aptas para uso estructural. En el gráfico N° 16 vemos esta misma distribución pero discriminada por tipo de tabla (A-B-C),

**Cuadro N° 16: Porcentaje 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	(%)	Cant	(%)	Cant	(%)
< E 50			6	8,3	1	1,1	1	1,2
E 50	40-60	3920-5880	47	65,3	38	43,2	13	15,1
E 70	60-80	5880-7850	19	26,4	26	29,5	25	29,1
E 90	80-100	7850-9810	0	0,0	13	14,8	20	23,3
E 110	100-120	9810-11770	0	0,0	7	8,0	17	19,8
E 130	120-140	11770-13730	0	0,0	1	1,1	5	5,8
> E 130	> 140	> 13730	0	0,0	2	2,3	5	5,8
<b>Porcentaje de tablas de categoría estructural</b>			<b>0,0</b>		<b>26,1</b>		<b>54,7</b>	



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



**Gráfico N° 25: Porcentaje 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° 17).

**Cuadro N° 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS – *Pinus elliottii* Eng. del Norte**

Troza 1		< E 50		E 50		E 70		E 90		> E 90	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
A	26	0	0,0	20	76,9	6	23,1	0	0,0	0	0,0
B	32	0	0,0	11	34,4	11	34,4	5	15,6	5	15,6
C	41	1	2,4	4	9,8	5	12,2	10	24,4	21	51,2
<b>Total</b>	<b>99</b>	<b>1</b>		<b>35</b>		<b>22</b>		<b>15</b>		<b>26</b>	

Troza 2		< E 50		E 50		E 70		E 90		> E 90	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
A	24	2	8,3	15	62,5	7	29,2	0	0,0	0	0,0
B	27	0	0,0	13	48,1	6	22,2	4	14,8	4	14,8
C	28	0	0,0	4	14,3	9	32,1	9	32,1	6	21,4
<b>Total</b>	<b>79</b>	<b>2</b>		<b>32</b>		<b>22</b>		<b>13</b>		<b>10</b>	

Troza 3		< E 50		E 50		E 70		E 90		> E 90	
Tabla	N°	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%	Tabla	%
A	22	4	18,2	12	54,5	6	27,3	0	0,0	0	0,0
B	29	1	3,4	14	48,3	9	31,0	4	13,8	1	3,4
C	17	0	0,0	5	29,4	11	64,7	1	5,9	0	0,0
<b>Total</b>	<b>68</b>	<b>5</b>		<b>31</b>		<b>26</b>		<b>5</b>		<b>1</b>	

De las primeras trozas se obtuvieron 26 tablas "A", de las segundas trozas se obtuvieron 24 tablas "A" y de las terceras trozas 22 tablas, de todas las alturas y ubicaciones "A" ninguna califica como madera estructural.

En la primeras trozas se obtuvieron 32 tablas con la ubicación "B" de las cuales 10 califican para uso estructural un 31,2 %, en las segundas trozas se obtuvieron 27 tablas "B" de las cuales 8 califica, un 29,6 % y de las terceras trozas 29 tablas de las cuales 5 califica un 17,2 %.

En el caso de las tablas obtenidas en la ubicación "C", de las primeras trozas de las 41 tablas obtenidas, 31 tablas, un 75,6 % son aptas para el uso estructural, en las segundas trozas, de las 28 tablas 15 son aptas, 53,5 % y de las terceras trozas de 17 tablas 1 sola es apta, 5,9 %.

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

A partir de los sobrantes sanos de las tablas o vigas de 2,8 m x 150 mm x 50 mm (2"x 6") ensayadas anteriormente, de las zonas no afectadas por el ensayo destructivo 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 determino 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%, determinando la humedad de equilibrio de la madera mediante el peso constante de las mismas. El contenido de humedad promedio de las probetas en el momento del ensayo fue de 11,6%.

Los cuadros N° 18 y N° 19 que siguen muestran los promedios de las propiedades estudiadas para las probetas provenientes de todas las tablas (A, B y C).

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

	FLEXIÓN ESTÁTICA			
	MOE	MOR	Densidad Corriente	Contenido de Humedad
	(MPa)	(MPa)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
Número	248	248	240	240
<b>Media</b>	<b>6570</b>	<b>72,4</b>	<b>0,412</b>	<b>11,6</b>
Máximo	17050	129,1	0,625	13,1
Mínimo	2517	34,0	0,308	9,8
Desvío std.	2215	16,6	0,063	0,6
<b>CV (%)</b>	<b>33,7</b>	<b>22,9</b>	<b>15,3</b>	<b>5,2</b>

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

	FLEXIÓN DINÁMICA	DUREZA JANKA		
	Resistencia al Impacto	Radial	Tangencial	Transversal
	(J/cm <sup>2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Número	244	248	248	23
<b>Media</b>	<b>3,5</b>	<b>27,2</b>	<b>30,0</b>	<b>38,3</b>
Máximo	9,8	61,3	72,2	55,0
Mínimo	0,9	11,0	11,2	27,5
Desvío std	1,8	9,4	10,1	7,0
<b>CV (%)</b>	<b>51,7</b>	<b>34,5</b>	<b>33,5</b>	<b>18,4</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 lo observado en trabajos anteriores del Grupo Técnico de Madera Aserrada GT2 y GT3 para eucaliptos y pinos respectivamente, trabajos que ya referenciados anteriormente. Los valores promedio de este estudio son sensiblemente mayores a los observados en Informe N° 1 "Propiedades Mecánicas de *Pinus Elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay", donde los valores medios fueron 33,8 MPa dureza transversal, 26,7 MPa dureza tangencial y 24,2 MPa dureza radial.

### 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.

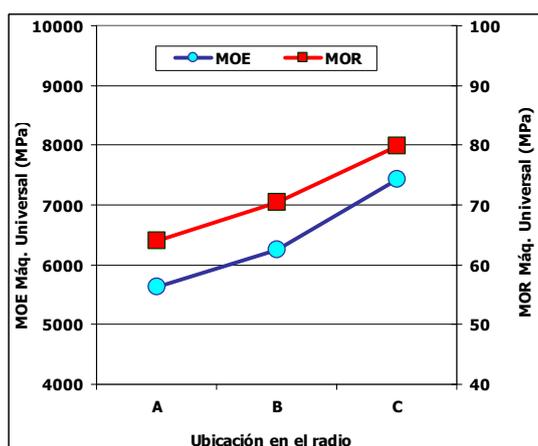
**Cuadro N° 20: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Dens. Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
A	72	5623	26,4	64,0	17,1	0,380	10,3
B	88	6251	28,0	70,3	19,3	0,402	12,6
C	84	7419	26,4	80,0	16,7	0,443	10,6

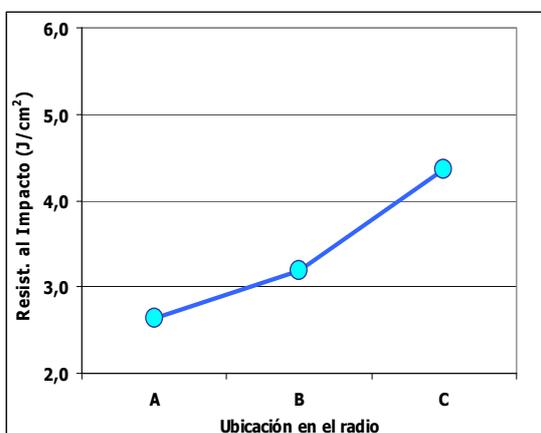
**Cuadro N° 21: Propiedades mecánicas según su ubicación en el radio**

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka tangencial (MPa)		Dureza Janka transversal (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
		A	72	2,6	44,0	24,7	28,2	27,8	31,8
B	88	3,2	43,8	24,4	28,6	27,6	23,6	38,9	23,4
C	84	4,4	35,1	30,9	26,7	33,4	32,2	41,1	22,3

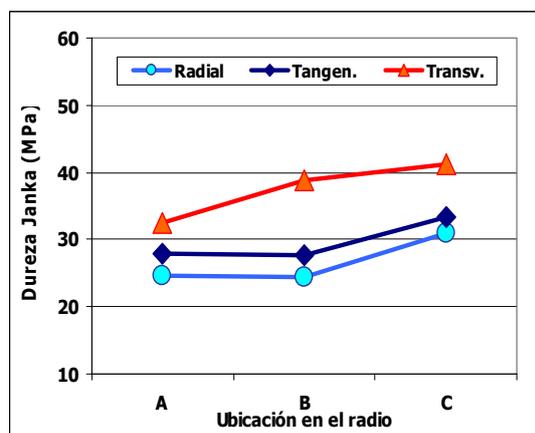
En los gráficos N° 26, 27 y 28, se ilustra la tendencia de las propiedades en función del radio. Para todas ellas hay un aumento en su magnitud a medida que se alejan de la médula.



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



**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. En este estudio se observó esa tendencia, pero con la excepción de que la diferencia de los valores promedio entre la segunda y tercer troza no

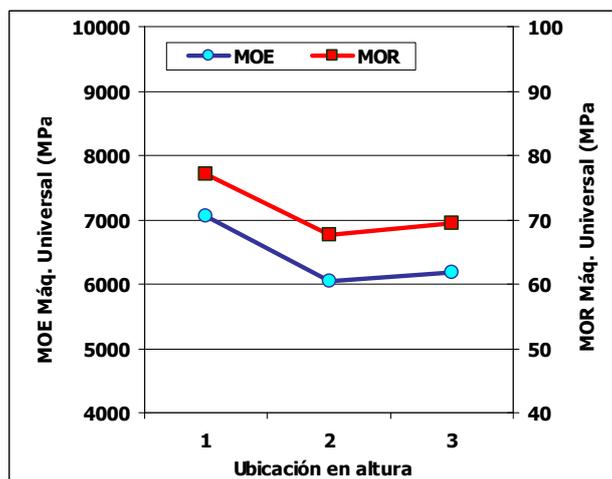
son importantes. Y en el caso del MOE y el MOR se observa que aumenta el valor promedio en la tercer troza, pero no en forma significativa.

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

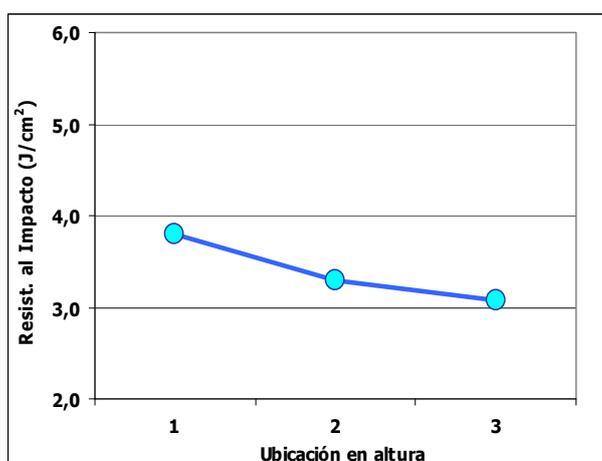
Troza	N°	MOE (MPa)		MOR (MPa)		Densidad Corriente (g/cm <sup>3</sup> )	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
1	101	7065	32,5	77,0	21,5	0,432	13,3
2	75	6055	23,9	67,8	14,8	0,391	10,4
3	68	6175	24,3	69,5	16,8	0,402	9,8

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

Probeta	N°	Resistencia al Impacto (J/cm <sup>2</sup> )		Dureza Janka Radial (MPa)		Dureza Janka tangencial (MPa)		Dureza Janka transversal (MPa)	
		Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
		1	101	3,8	44,3	30,6	29,9	32,1	30,9
2	75	3,3	40,9	24,2	29,1	27,6	27,1	37,0	24,5
3	68	3,1	37,7	25,2	24,5	29,1	26,6	34,2	21,4

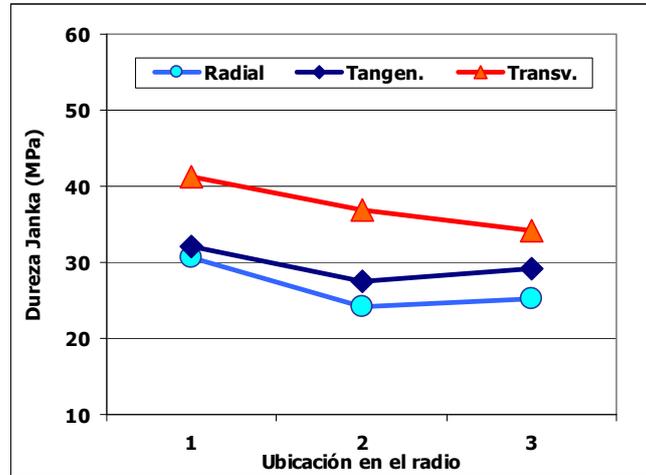


**Gráfico N° 29: MOE y MOR promedio según ubicación en altura**



**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.

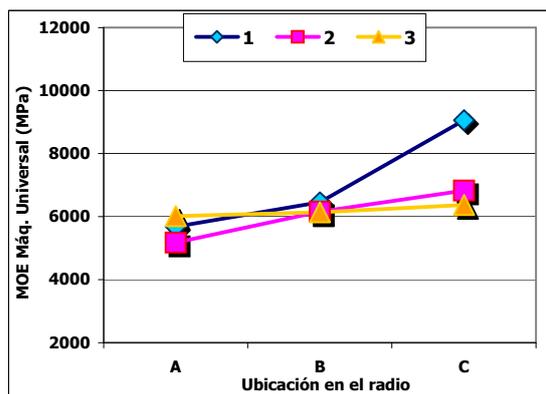


**Gráfico N° 31: Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en altura**

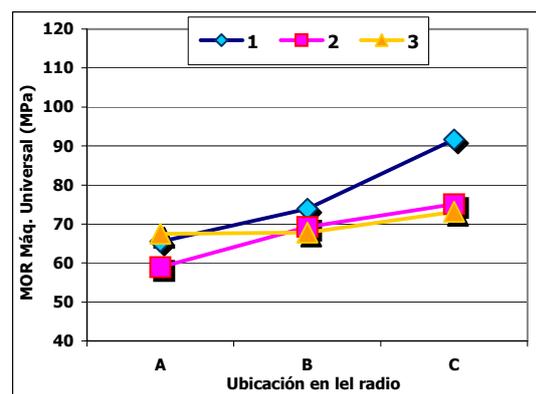
#### 6.3.4. Análisis de las propiedades mecánicas por altura según ubicación en el radio

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.

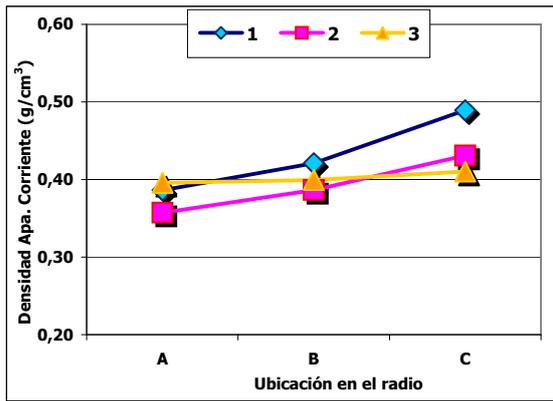
Se puede observar en los gráficos N° 32 y 33, que para la mayoría de los casos el aumento más marcado corresponde a la troza basal y en la ubicación "C", cosa que es muy razonable ya que en esta troza, por ser la de mayor edad, es donde van a existir mayores diferencias de edad cambial de la madera de las distintas probetas.



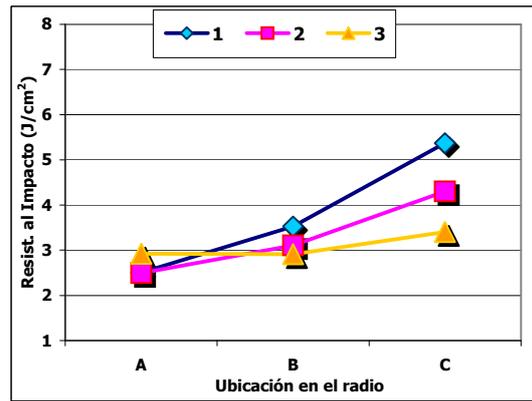
**Gráfico N° 32: MOE promedio por altura según ubicación en el radio**



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

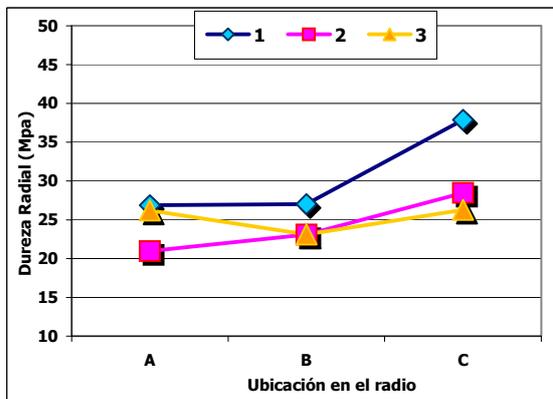


**Gráfico N° 34: Densidad corriente por altura según ubicación en el radio**

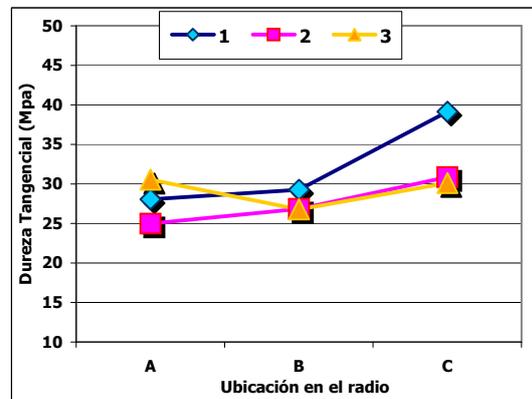


**Gráfico N° 35: Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio**

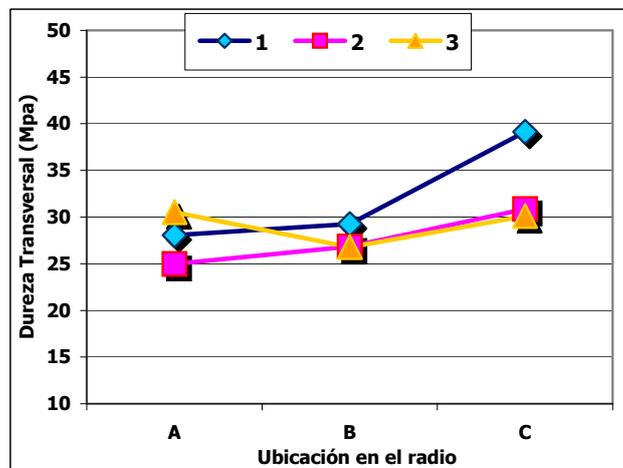
En la dureza existe una diferencia muy marcada entre las distintas trozas, siendo la troza basal claramente superior a las otras en la ubicación "C".



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



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



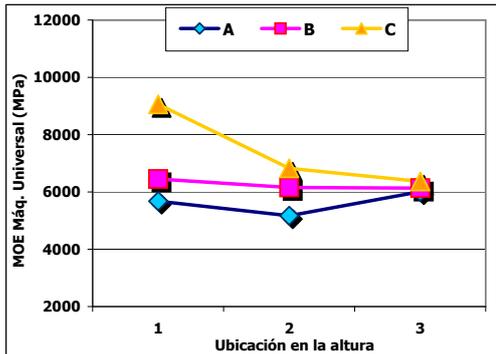
**Gráfico N° 38: Dureza transversal por altura según ubicación en el radio**

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

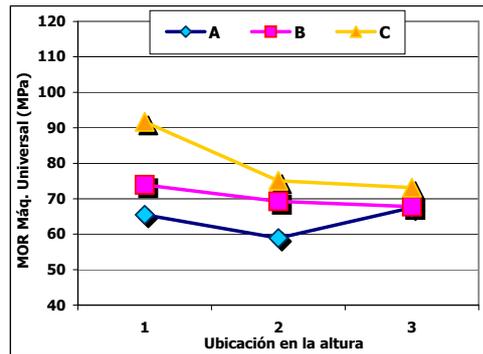
El siguiente es un análisis de las variaciones de las propiedades mecánicas de las probetas para cada una de las ubicaciones en el radio.

Se puede observar en los gráficos N° 39, 40, 41, 42, 43 y 44 que para todas las propiedades, las probetas "C" tienen los valores promedios mas altos, para todas las alturas analizadas y en especial en la primer troza. 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).

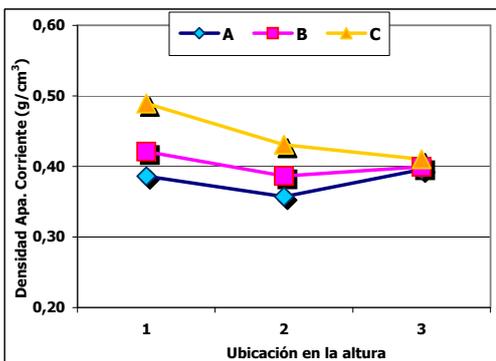
Por el contrario para todos los casos las probetas "A" son las que tienen los menores valores para todas las propiedades mecánicas.



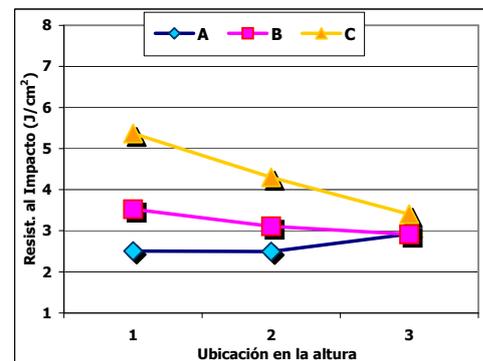
**Gráfico N° 39: MOE promedio por ubicación en el radio según altura**



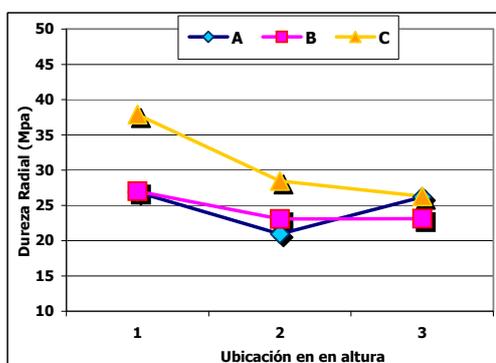
**Gráfico N° 40: MOR promedio por ubicación en el radio según altura**



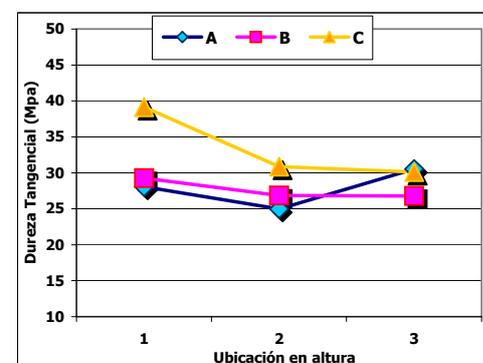
**Gráfico N° 41: Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura**



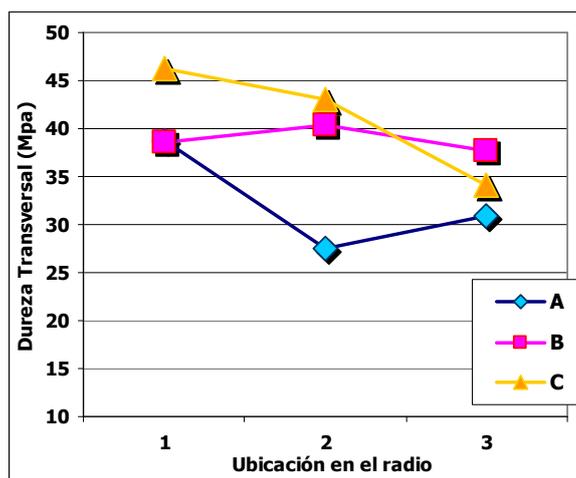
**Gráfico N° 42: Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura**



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



**Gráfico N° 44: Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura**



**Gráfico N° 45: Dureza transversal por ubicación en el radio según altura**

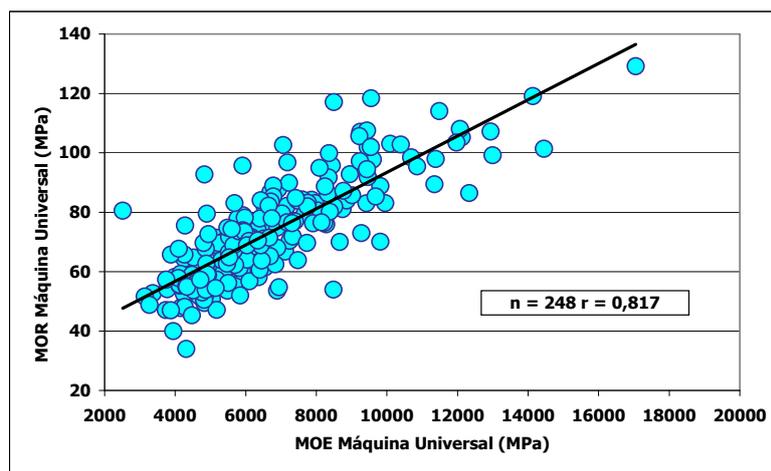
### 6.3.6 Relación entre las distintas propiedades en pequeñas probetas libres de defectos

Se busco analizar las correlaciones entre las distintas propiedades mecánicas y entre sí y también con la densidad aparente corriente. A continuación se muestran los coeficientes de correlación  $r$  entre los valores de las distintas propiedades, de resultados obtenidos de pequeñas probetas libres de defectos.

**Cuadro N° 24: Relaciones entre las distintas propiedades**

N = 248	MOE	MOR	Resistencia al Impacto	Dureza Radial	Dureza Tangencial	Dureza Transversal	Densidad Aparente Corriente
MOE	1	<b>0,817</b>	<b>0,521</b>	<b>0,525</b>	0,396	<b>0,571</b>	<b>0,774</b>
MOR		1	<b>0,585</b>	<b>0,643</b>	0,451	<b>0,776</b>	<b>0,853</b>
Resistencia al Impacto			1	<b>0,522</b>	0,445	0,459	<b>0,642</b>
Dureza Radial				1	<b>0,551</b>	0,347	<b>0,646</b>
Dureza Tangencial					1	0,327	<b>0,521</b>
Dureza Transversal						1	<b>0,758</b>
Densidad Apa. Corriente							1

Como se puede ver en el cuadro N° 24, las únicas propiedades con cierta correlación entre si son el MOE y el MOR, el MOE y el MOR con la densidad aparente corriente. Las otras propiedades si bien no muestran una alta relación, presentan algunos valores superiores al  $r = 0,50$ .



**Gráfico N° 46: Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos**

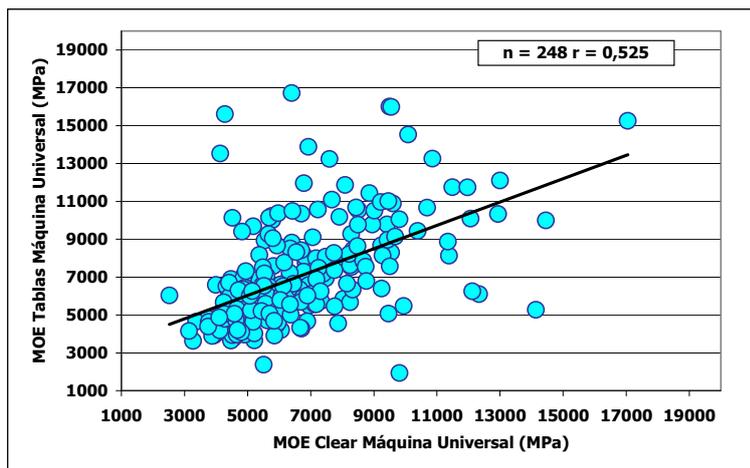
### 6.3.7 Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y de las pequeñas probetas libres de defectos

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

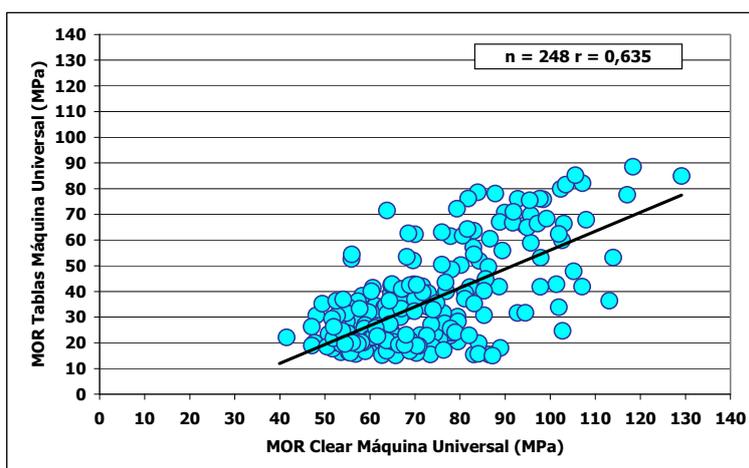
Probeta N°	FLEXIÓN ESTÁTICA PROBETAS B Y C			
	Probetas libres de defectos		Tablas	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Número	248	248	172	169
<b>Media</b>	<b>6570</b>	<b>72,4</b>	<b>6721</b>	<b>40,8</b>
Máximo	17050	129,1	15260	85,2
Mínimo	2517	34,0	4076	10,5
Desvío std	2215	16,6	2534	20,4
<b>CV (%)</b>	<b>33,7</b>	<b>22,9</b>	<b>37,7</b>	<b>49,9</b>

No se encontró relación alta entre el MOE de las tablas y el MOE de las probetas clear que se obtuvieron de las mismas (gráfico N° 45,  $r = 0,525$ ). 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 otras características de la madera. El valor medio del MOE de tablas fue de 6721 MPa y el de probetas clear 6570 MPa, generalmente este último levemente superior, pero en este estudio es un 2,2 % inferior. A diferencia de estudios anteriores no se observó grandes diferencias entre los valores promedio de MOE de las probetas clear y el de las tablas de 2"x 6", si se cumple lo esperado en el caso del MOR donde si existen diferencias muy significativas entre uno y otro, que como ya hemos mencionado esta propiedad esta muy influenciada por la presencia de defectos en la madera, haciendo que los valores de MOR sean inferiores en las tablas.



**Gráfico N° 47: Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas**

Para el MOR no se observó que existiera correlación mayor que en el MOE entre los valores encontrados en tablas y en los valores de las pequeñas probetas obtenidas de estas (gráfico N° 48,  $r = 0,635$ ). Para tablas el valor medio de MOR fue 40,8 MPa y para probetas clear fue de 72,4 MPa, vemos que existe una gran diferencia entre ambos valores, más de dos veces superior el valor de las probetas clear.



**Gráfico N° 48: 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 elliotii* Eng. (Informe N° 1, Propiedades Mecánicas de *Pinus elliotii* 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 *Pinus elliotii* de otras regiones del país.

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

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

**Cuadro N° 26: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas en condición verde**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad FFT Analyzer	No destructivo	13,8
Contenido de Humedad	Destructivo	22,8
Densidad Aparente Básica	Destructivo	15,0

**Cuadro N° 27: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,7 % CH. promedio**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad FFT Analyzer	No destructivo	32,1
Módulo de Elasticidad Fakopp	No destructivo	16,7
Módulo de Elasticidad	Destructivo	37,7
Módulo de Rotura	Destructivo	49,9
Contenido de Humedad	Destructivo	9,8
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	10,7

**Cuadro N° 28: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas libres de defectos a 11,6 % CH. promedio**

Propiedad	Tipo de ensayo	Coeficiente de variación (%)
Módulo de Elasticidad	Destructivo	33,7
Módulo de Rotura	Destructivo	22,9
Resistencia al Impacto	Destructivo	51,7
Dureza Radial	Destructivo	34,4
Dureza Tangencial	Destructivo	33,5
Dureza Transversal	Destructivo	18,4
Contenido de Humedad	Destructivo	5,2
Densidad Aparente Corriente	Destructivo	15,3

## 7. **BIBLIOGRAFÍA**

TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, Editorial Hemisferio Sur, 1986.

CORONEL, E./ Fundamento de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994.

TRENDELENBURG, R.,(1939) Das Holz als Rohstoff, p.p. 295 1 st ed, Munchen, J. F. LEHMEN VERLAG)

OHTA, S.; WATANABE, H./ Mechanical Properties of juvenile wood in the stem of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Japan Wood Research Society, 1968. 14 (5).

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.

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.

O'NEILL, H./ Propiedades mecánicas de *Pinus taeda*, Métodos destructivos y no destructivos, Expoforesta, Pág. 15 a 24, 2000.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus elliottii* Eng. del Litoral de Uruguay, Informe N° 1, Octubre 2002.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Litoral de Uruguay, Informe N° 2, Junio 2003.

Grupo Técnico de Madera aserrada de Pino "GT3"./ Propiedades Mecánicas de *Pinus taeda* L. del Norte de Uruguay, Informe N° 3, Junio 2004.

## FICHA TECNICA DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Especie : *Pinus elliottii* Eng.

Ensayos realizados en 25 árboles de 23 años de edad

Localidad de origen : Rivera

### Propiedades Físicas

Propiedad	Norma	Unidades	Valor
Densidad Básica	ASTM D 2395 Method B-III	g/cm <sup>3</sup>	0,396
Densidad Corriente	ASTM D 2395 Method A	g/cm <sup>3</sup>	0,462

### Propiedades Mecánicas

En tablas dimensionadas (2.80 m x 150 mm x 50 mm) – CH = 10,7%  
(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	8566	Kgf/cm <sup>2</sup>	87349
Módulo de Elasticidad (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	8396	Kgf/cm <sup>2</sup>	85616
Módulo de Rotura (Máquina Universal)	ASTM D 198-98	MPa	45.3	Kgf/cm <sup>2</sup>	462

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

Propiedad	Norma	Unidades SI	Valor	Unidades	Valor
Módulo de Elasticidad (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	6570	Kgf/cm <sup>2</sup>	66996
Módulo de Rotura (Flexión Estática)	JIS Z 2113 - 94	MPa	72,4	Kgf/cm <sup>2</sup>	738
Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica)	JIS Z 2116 - 94	J/cm <sup>2</sup>	3,5	Kgf.m/cm <sup>2</sup>	0,36
Dureza Janka Radial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	27,2	Kgf	277
Dureza Janka Tangencial	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	30,0	Kgf	306
Dureza Janka Transversal	ASTM D 143 – 94 Hardness	MPa	38,3	Kgf	391

### 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

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
N° 1: Parte de la trozas muestreadas _____	2
N° 2: Esquema de preparación e identificación de las probetas _____	4
N° 3: Esquema de ubicación de madera juvenil y adulta, de albura y duramen en árboles en pie _____	4
N° 4: Determinación Módulo de Elasticidad en trozas mediante FFT Analyzer _____	6
N° 5 y 6: Esquema de obtención e identificación de tablas (2"x 6") en ubicaciones A-B-C en las trozas _____	6
N° 7 y 8: Aserrado de las trozas para obtención de tablas (2"x 6") _____	7
N° 9: Determinación del MOE en tablas mediante el FFT Analyzer _____	8
N° 10: Esquema de ensayo de flexión estática 4 puntos en máquina universal _____	9
N° 11: Esquema y ensayo de Flexión Estática en 3 puntos en máquina universal _____	11
N° 12: Ensayo de Resistencia al Impacto (Flexión Dinámica) _____	12
N° 13: Ensayo de Dureza Janka, probeta de ensayo y accesorio _____	12
N° 14: Tipo de rotura por tensión y por corte en área nudosa _____	20

<b>Cuadros</b>	<b>Página</b>
N° 1: Clases diamétricas de los ejemplares seleccionados _____	2
N° 2: Datos técnicos del rodal _____	2
N° 3: Podas realizadas _____	3
N° 4: Raleos realizados _____	3
N° 5: Porcentaje de las trozas según la categoría a la que pertenecen _____	13
N° 6: Resultados de Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica _____	13
N° 7: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en el radio _____	14
N° 8: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en altura _____	15
N° 9: MOE con corteza (FFT Analyzer) según troza _____	17
N° 10: MOE promedio con y sin corteza _____	18
N° 11: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas secas (solo tablas B y C) _____	19
N° 12: Resumen de las propiedades mecánicas de las tablas B y C de la 1° y 2° troza _____	20
N° 13: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en el radio _____	23
N° 14: Resumen de las propiedades mecánicas según ubicación en la altura _____	24
N° 15: Proporción de tablas según categoría JAS _____	27
N° 16: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio según categoría JAS _____	27
N° 17: Porcentaje de tablas por ubicación en el radio y en la altura aptas para uso estructural según norma JAS - <i>Pinus elliotii</i> Eng. del Norte _____	28
N° 18: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	29
N° 19: Resumen de las propiedades mecánicas de pequeñas probetas _____	29
N° 20: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	29
N° 21: Propiedades mecánicas según ubicación en el radio (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	30
N° 22: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (MOE, MOR y Densidad Corriente) _____	31
N° 23: Propiedades mecánicas según su ubicación en altura (Resistencia al Impacto y Dureza) _____	31
N° 24: Relación entre las distintas propiedades _____	35
N° 25: Relación entre las propiedades mecánicas de las tablas y las pequeñas probetas libres de Defectos (probetas "B" y "C") _____	36
N° 26: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de trozas, tablas o vigas de tamaño real y probetas libres de defectos _____	38
N° 27: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de tablas de tamaño real a 11,7 % C.H. promedio _____	38
N° 28: Coeficientes de variación de las propiedades físicas y mecánicas de pequeñas probetas Libres de defectos a 11,6 % C.H. promedio _____	38

<b>Gráficos</b>	<b>Página</b>
N° 1: Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación radial _____	14
N° 2: Densidad Aparente Básica según anillo medio de la probeta _____	14
N° 3: Contenido de Humedad por altura según ubicación en el radio _____	15

N° 4:	Densidad Aparente Básica por altura según ubicación en el radio	15
N° 5:	Contenido de Humedad y Densidad Aparente Básica según ubicación en la altura	16
N° 6:	Contenido de Humedad por probeta según ubicación en altura	16
N° 7:	Densidad Aparente Básica por probeta según ubicación en altura	16
N° 8:	Variación de los valores de MOE entre árboles y entre trozas	17
N° 9:	Módulo Elástico (FFT Analyzer) de trozas y con corteza según la posición en altura	18
N° 10:	Relación entre MOE (FFT Analyzer) con y sin corteza	18
N° 11:	Relación entre la velocidad de crecimiento (expresada como DAP) y el MOE promedio	19
N° 12:	Relación entre el MOE (Máquina universal) y el MOE (FFT Analyzer)	21
N° 13:	Relación entre el MOE Fakopp y el MOE Máquina Universal de las tablas "C"	22
N° 14:	Relación entre el MOE FFT Analyzer y el MOE Máq. Universal de tablas "C"	22
N° 15:	Relación entre el MOR y el MOE en tablas	22
N° 16:	Relación entre la Densidad Aparente Corriente y el Módulo Elasticidad (Máquina Universal)	23
N° 17:	Variación del MOE y el MOR según ubicación en el radio	23
N° 18:	MOE promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	24
N° 19:	MOR promedio de las tablas por ubicación en el radio según altura	24
N° 20:	MOE y MOR según ubicación en altura	25
N° 21:	MOE promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	25
N° 22:	MOR promedio de tablas por ubicación en el radio según altura	25
N° 23:	Relación entre el MOE de las trozas y el MOE promedio de las tablas obtenidas	26
N° 24:	Porcentaje de tablas ensayadas según categoría JAS	27
N° 25:	Porcentaje de tablas ensayadas por tipo según categoría JAS	27
N° 26:	MOE y MOR promedio según ubicación en el radio	30
N° 27:	Resistencia al Impacto según ubicación en el radio	30
N° 28:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en el radio	30
N° 29:	MOE y MOR promedio según ubicación en altura	31
N° 30:	Resistencia al Impacto según ubicación en altura	31
N° 31:	Dureza radial y tangencial promedio según ubicación en la altura	32
N° 32:	MOE promedio por altura según ubicación en el radio	32
N° 33:	MOR promedio por altura según ubicación en el radio	32
N° 34:	Densidad corriente por altura según ubicación en el radio	33
N° 35:	Resistencia al impacto por altura según ubicación en el radio	33
N° 36:	Dureza tangencial por altura según ubicación en el radio	33
N° 37:	Dureza radial por altura según ubicación en el radio	33
N° 38:	Dureza transversal por altura según ubicación en el radio	33
N° 39:	MOE promedio por ubicación en el radio según altura	34
N° 40:	MOR promedio por ubicación en el radio según altura	34
N° 41:	Densidad Corriente por ubicación en el radio según altura	34
N° 42:	Resistencia al Impacto por ubicación en el radio según altura	34
N° 43:	Dureza radial por ubicación en el radio según altura	34
N° 44:	Dureza tangencial por ubicación en el radio según altura	34
N° 45:	Dureza transversal por ubicación en el radio según altura	35
N° 46:	Relación entre el MOE y el MOR en pequeñas probetas libres de defectos	36
N° 47:	Relación del MOE entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas	37
N° 48:	Relación del MOR entre las probetas clear y las tablas de las que fueron obtenidas	37