

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente

**APLICACIÓN DE ULTRASONIDO, EN LA ESTIMACION DEL
MODULO DE ELASTICIDAD REAL DE LA MADERA**



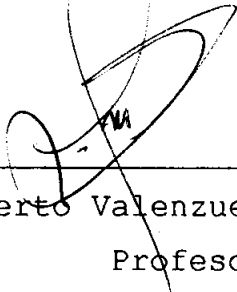
**MEMORIA PARA OPTAR
AL TITULO DE
INGENIERO FORESTAL**

CONCEPCION-CHILE

1999


APLICACIÓN DE ULTRASONIDO, EN LA ESTIMACION DEL MODULO DE
ELASTICIDAD REAL DE LA MADERA

Profesor Asesor



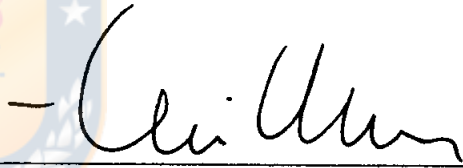
Luis Alberto Valenzuela Hurtado;
Profesor Asociado;
Ingeniero de Ejec. en Maderas, Ph D.

Profesor Asesor



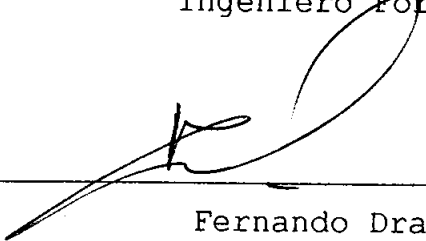
Roberto Melo Sanhueza;
Profesor Titular;
Ingeniero Civil Químico.

Director Departamento
Manejo de Bosques
Y medio Ambiente



Jaime Millán Herrera;
Profesor Titular;
Ingeniero Forestal, Dr.

Decano Facultad de
Ciencias Forestales



Fernando Drake Aranda;
Profesor Asociado;
Ingeniero Forestal.

Calificación de la memoria de título:

Luis Valenzuela Hurtado: ochenta puntos.

Roberto Melo Sanhueza : ochenta y seis puntos.



A Mamá y Papá

INDICE DE MATERIAS

| CAPITULOS | PAGINA |
|---|--------|
| I INTRODUCCION..... | 1 |
| II OBJETIVOS..... | 4 |
| III MATERIAL Y METODO..... | 5 |
| 3.1 MATERIAL..... | 5 |
| 3.2 Confección de las muestras..... | 5 |
| 3.3 Medición del ancho de anillo de crecimiento y de la densidad..... | 6 |
| 3.3.1 Ancho de anillo de crecimiento..... | 6 |
| 3.3.2 Densidad..... | 6 |
| 3.4 Mediciones con ultrasonido..... | 7 |
| 3.4.1 Largo, espesor y ancho..... | 7 |
| 3.4.2 Determinación del tiempo de propagación de pulsos de ultrasonido..... | 7 |
| 3.4.3 Determinación del módulo de elasticidad a través de ultrasonido..... | 8 |
| 3.5 Ensayos en flexión..... | 10 |
| 3.5.1 Módulo de Elasticidad Real y Módulo de Cizalle Horizontal..... | 10 |
| 3.6 Modelo matemático para módulos de elasticidad real, radial y tangencial..... | 13 |
| IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 15 |
| 4.1 Velocidad de propagación con relación a la dirección de propagación..... | 15 |
| 4.2 Propiedades físicas y mecánicas..... | 17 |
| 4.3 Estimación del Módulo de Elasticidad Real. | 18 |
| 4.4 Verificación de los modelos obtenidos..... | 19 |
| V CONCLUSIONES..... | 27 |

CAPITULOS

PAGINA

| | | |
|------|-------------------|----|
| VI | RESUMEN..... | 28 |
| VII | SUMMARY..... | 29 |
| VIII | BIBLIOGRAFIA..... | 31 |
| IX | APENDICES..... | 34 |
| X | ANEXOS..... | 45 |



INDICE DE TABLAS

| TABLA N° | | PAGINA |
|-----------------------|--|--------|
| <u>En el texto</u> | | |
| 1 | Parámetros estadísticos de la velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en las direcciones longitudinal, radial y tangencial.. | 16 |
| 2 | Parámetros estadísticos para las diferentes variables medidas..... | 17 |
| 3 | Matriz de correlación de Pearson..... | 18 |
| 4 | Funciones de regresión para módulos de elasticidad y sus estadísticas asociadas..... | 19 |
| 5 | Datos para la obtención de la razón C..... | 21 |
| 6 | Promedios de valores experimentales y predictos de MOE radial y las correspondientes diferencias para cada relación l/h | 23 |
| 7 | Promedios de valores experimentales y predictos de MOE tangencial y las correspondientes diferencias para cada relación l/h | 26 |
| <u>En el apéndice</u> | | |
| 1A | Tabla de análisis de varianza para modelo de Módulo de Elasticidad Radial..... | 34 |

| TABLA N° | PAGINA |
|---|--------|
| 2A Tabla de análisis de varianza para modelo de Módulo de Elasticidad tangencial..... | 34 |
| 3A Tabla de análisis de varianza para modelo de Módulo de Elasticidad Total..... | 34 |
| 4A Base de datos para la construcción de modelos matemáticos para Módulos de Elasticidad Real, Radial y tangencial..... | 35 |
| 5A Base de datos para la obtención del módulo de elasticidad aparente a l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos E_r , E_{tot} y $E(D)$, para probetas cargadas en dirección radial..... | 36 |
| 6A Base de datos para la obtención del módulo de elasticidad aparente a l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos E_r , E_{tot} y $E(D)$, para probetas cargadas en dirección tangencial..... | 38 |
| 7A Base de datos para la obtención de las diferencias entre MOE experimentales y MOE predictos para l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos E_r , E_{tot} y $E(D)$, para probetas cargadas en dirección radial. Diferencias con y sin valor absoluto..... | 40 |

| | | |
|----|---|----|
| 8A | Base de datos para la obtención de las diferencias entre MOE experimentales y MOE predictos para l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos E_r , E_{tot} y $E(D)$, para probetas cargadas en dirección tangencial. Diferencias con y sin valor absoluto..... | 42 |
|----|---|----|



INDICE DE FIGURAS

| FIGURA N° | PAGINA |
|--------------------|--|
| <u>En el texto</u> | |
| 1 | Diagrama de las probetas utilizadas en el Ensayo..... 7 |
| 2 | Montaje utilizado para la medición de tiempos de propagación de pulsos de ultrasonido..... 7 |
| 3 | a) Dirección de las cargas para la determinación de módulos de elasticidad. b) Condiciones de carga de las probetas, a cinco luces..... 11 |
| 4 | Velocidades de propagación de pulsos de ultrasonido en dirección longitudinal, radial y tangencial..... 16 |
| 5 | Regresiones para valores de MOE experimental versus MOE predictos, en viguetas cargadas en dirección radial, con modelo E_r , E_{tot} y $E(D)$ 24 |
| 7 | Regresiones para valores de MOE experimental versus MOE predictos, en viguetas cargadas en dirección tangencial, con modelo E_r , E_{tot} y $E(D)$ 24 |

FIGURA N°

En el anexo

| | | |
|----|---|----|
| 1B | Tiempo de retardo de onda a su paso por la madera..... | 45 |
|----|---|----|



I INTRODUCCION

La evaluación no destructiva de materiales es la ciencia de identificar propiedades físicas y mecánicas de piezas de material sin alterar su capacidad de uso final (Ross et al. 1991b).

Así durante años diversas técnicas han sido utilizadas en la medición de propiedades mecánicas de la madera, donde inicialmente, sólo se usaron métodos estáticos para medir propiedades mecánicas en probetas pequeñas y de tamaño estructural. Las propiedades más frecuentemente medidas estáticamente han sido flexión, compresión y tracción paralela a la fibra.

En los años cincuenta, se iniciaron a mayor escala las mediciones de propiedades dinámicas; Jayne 1959 citado por Campos 1991, desarrolló una técnica de ensayo dinámico no destructivo para medir resistencia en madera libre de defectos. Miller y Tardif, 1967 citados por Campos 1991, desarrollaron un clasificador vibracional para realizar índices de calidad, que se basó en la medición del módulo de elasticidad dinámico de las piezas sometidas a flexión. Diversas investigaciones se han llevado a cabo usando vibraciones como instrumento de medición de las propiedades dinámicas de la madera (Pellerin 1965; Orosz 1977; Chui 1989; Chui y Smith 1989a citados por Campos 1991.)

Estas técnicas de evaluación han sido utilizadas en laboratorio y en algunos casos se pueden usar en estructuras ya existentes. Los siguientes métodos son tipos

de ensayos no destructivos: **métodos eléctricos**, estos son usados en el estudio del comportamiento de la madera frente a líquidos; **métodos radiactivos** con un amplio rango de aplicación en la detección de defectos y estudios cuantitativos de la anatomía de la madera y detección de defectos y **métodos acústicos** donde encontramos estudios de determinación de constantes elásticas de la madera, evaluación de la calidad de la madera aserrada y paneles de partículas, además son ampliamente usados en la determinación de propiedades mecánicas de la madera, como el **módulo de elasticidad** (Szymani y Mc Donald 1981; Bucur y Archer 1984; Campos 1991; Bucur 1984 citado por Bravo 1996).

Los métodos acústicos se relacionan con la propagación de ondas mecánicas a través de la madera, entre ellos tenemos las Emisiones acústicas, Acusto-ultrasonido y Ultrasonido. La diferencia entre ellos es la fuente de energía que provoca la señal a analizar, siendo para las emisiones acústicas una fuente natural, como la formación de una grieta, mientras que para las de ultrasonido la fuente de la señal es un transductor externo. Y el acusto-ultrasonido consiste en combinar la sensibilidad de los transductores de emisiones acústicas con los transmisores de ultrasonido para evaluar el cambio de energía de una señal a su paso por el material y se diferencia de las técnicas de ultrasonido convencionales, en que fallas más sutiles pueden ser detectadas (Beall 1987 citado por Bravo 1996).

Los ultrasonidos corresponden a ondas elásticas inaudibles cuya frecuencia es superior a 16 Khz (las frecuencias audibles por el oído humano van de 16 Hz a 16 Khz (Muzzioli

1961)), y son los métodos acústicos comúnmente usados en las evaluaciones no destructivas.

El uso de estos pulsos de ultrasonido se basa en una teoría unidimensional de ondas de esfuerzo, que señala que la velocidad de propagación de una onda de esfuerzo inducida en un cuerpo isotrópico y homogéneo es función del módulo de elasticidad y de su densidad, expresándose mediante la ecuación:

$$V = \sqrt{E / D} \quad \text{ec.1}$$

Donde; V es la velocidad de pulsos de ultrasonido, E el módulo de elasticidad y D la densidad del material (Gerhards 1975a; Groom and Polensek 1987; Ross et al. 1991b).

Así tenemos que el ultrasonido muestra ser una técnica de evaluación no destructiva, con importantes ventajas con respecto a los ensayos mecánicos, los que siempre están relacionados a una destrucción total o parcial de la muestra en estudio, evitando por ejemplo, su uso en estructuras ya existentes.

El objetivo de esta memoria de título fue aplicar la técnica de ultrasonido en la estimación del módulo de elasticidad de la madera.

II OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

- Aplicar la técnica de ultrasonido en la estimación del Módulo de Elasticidad Real de la madera.

2.2 Objetivos específicos.

- Estimar el Módulo de Elasticidad Real de la madera (E), radial y tangencial, a través de ultrasonido y otras propiedades físicas como Densidad y Ancho de Anillo de Crecimiento.
- Estimar el Módulo de Elasticidad Aparente de la madera (MOE), radial y tangencial, a través de ultrasonido y otras propiedades físicas como Densidad y Ancho de Anillo de Crecimiento.

III MATERIAL Y METODO

3.1 Material.

El material utilizado se obtuvo de un stock residual de ensayos de flexión estática en madera, procedente de un rodal de *Pinus radiata* D. Don de 52 años del Fundo Pinares de la comuna de Concepción. El stock consistía en 190 viguetas de sección cuadrada de 2 x 2cm y largos variables.

3.2 Confección de las muestras.

De las 190 viguetas, se tomaron 58 a las que se procedió a rebajar hasta un largo uniforme de 56cm.

Luego, desde sus extremos, se cortaron probetas (cubos) de madera, de dimensiones aproximadas de 2 cm de espesor y ancho, para ser usadas en los ensayos de ultrasonido. Siendo el largo final de las viguetas de 54 cm. Estos cortes se realizaron con sierra circular, en los laboratorios del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío. Las probetas que presentaron rugosidad en algunas de sus caras, fueron lijadas para obtener una superficie sin rugosidad.

Estas probetas fueron libres de defectos y 100% tangenciales y radiales con respecto al plano neutro de ellas. Las que no cumplieron con estas características fueron descalificadas quedando un total de 48 para realizar el ensayo.

El material fué acondicionado a una temperatura de 24°C con humedad relativa de 60%, con el objetivo de obtener una humedad de equilibrio de la madera de un 12% aproximadamente, en una cámara climática de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Química de la Universidad de Concepción.

3.3 Medición del Ancho de Anillo de Crecimiento y de la Densidad.

Fueron medidas en cada una de las 48 probetas cortadas desde el extremo de las viguetas.

3.3.1 Ancho de Anillo de Crecimiento. Para obtenerlo, se trazó una tangente en el anillo más bajo y otra en él más alto, luego se midió la distancia entre ellos y se dividió por la cantidad de anillos existentes en la distancia medida. Procedimiento que se realizó en ambas secciones transversales de las probetas, para después tomar el promedio aritmético de ellas como dato.

3.3.2 Densidad. Se utilizó la Densidad de Referencia al 9% promedio (Nch 176/2), midiendo y pesando la probeta a dicho contenido de humedad. Para su cálculo se utilizó la relación:

$$D = P / V \quad (ec.2)$$

donde: D =densidad al contenido de humedad de 9%.
(gr/cm³).
P = peso de la probeta al 9% de CH (gr).
V = volumen al 9% de CH (cm³).

3.4 Mediciones con Ultrasonido.

3.4.1 Largo, Espesor y Ancho. Se midieron con tornillo micrométrico de 0,01mm de precisión el largo **l** medido en dirección longitudinal, el espesor **h** en dirección radial y ancho **b** en dirección tangencial(Figura 1). Mediciones que posteriormente se utilizaron para determinar la velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido, como se explica en el punto 3.4.3.

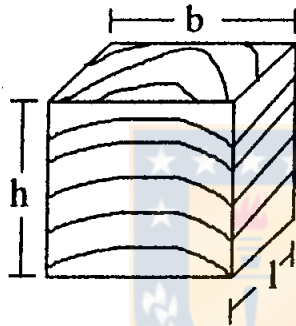


FIGURA 1. Diagrama de las probetas utilizadas en el ensayo donde: largo (l), espesor (h) y ancho (b).

3.4.2 Determinación del tiempo de propagación de pulsos de ultrasonido. Para medir el tiempo de propagación de pulsos de ultrasonido se utilizó un equipo de ultrasonido Parametrics 5800 PR con transductores Parametrics de 1MHz y un Osciloscopio Kenwood CS-4025, (Figura 2).

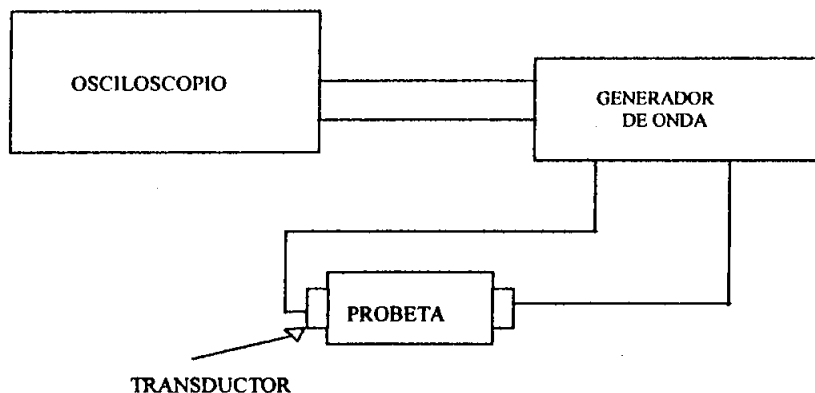


FIGURA 2. Montaje utilizado para la medición de tiempos de propagación de pulsos de ultrasonido.

Se colocó en ambos extremos de las probetas un acoplante (marca Parametrics), que tiene la función de homogeneizar la superficie de prueba para un adecuado contacto del transductor, evitando así que exista aire entre ellas o partículas sólidas las cuales podrían reflejar y dispersar el haz, generando errores en las mediciones. Luego se procedió a medir en cada probeta el tiempo de propagación de pulsos en dirección longitudinal, radial y tangencial (Principio del método en Anexo 1).

Estas mediciones fueron realizadas en el departamento de Física de la Universidad del Bío-Bío, Concepción.

3.4.3 Determinación del Módulo de Elasticidad a través de ultrasonido. Al módulo de elasticidad medido por ultrasonido lo llamaremos módulo de elasticidad dinámico (E_d).

Y se obtiene, primero, utilizando la relación:

$$V = L / T \quad (\text{ec.3})$$

donde:

V = velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido (m/s).

L = longitud de la cara medida de la pieza. (radial, tangencial o longitudinal)

T = tiempo obtenido mediante ultrasonido. (radial, tangencial o longitudinal)

de la que obtenemos la velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido para cada pieza, en sentido longitudinal (V_L), radial (V_R) y tangencial (V_T).

Obtenidas las velocidades de propagación y conociendo las densidades de las probetas en las direcciones de propagación, se procede al cálculo del E_d , aplicando la ecuación 1. (Gerhards 1975(a); Groom and Polensek 1987; Ross and Pellerin 1991 (b))

$$v = \sqrt{E_d/D} \quad (\text{ec.4})$$

despejando obtenemos:

$$E_d = v^2 * D \quad (\text{ec.5})$$

donde:

V = velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido.

E_d = módulo de elasticidad dinámico.

D = densidad del material.

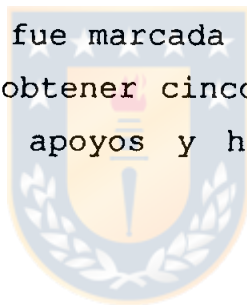
3.5 Ensayos en flexión.

A las 48 viguetas se les determinó el Módulo de Elasticidad Real (E) y Módulo de Cizalle Horizontal (G).

Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina METROCOM NOVARA (Máquina universal de ensayos), del Laboratorio de Mecánica de sólidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción.

3.5.1 Módulo elasticidad real y Módulo de cizalle horizontal. Fueron medidos para todas las viguetas, en dirección radial y tangencial (figura 3(a)).

Para ello cada vigueta fue marcada a cinco luces l (16, 28, 32, 44, 48), para así obtener cinco relaciones l/h donde l es la distancia entre apoyos y h espesor de la vigueta (2cm) (figura 3(b)).



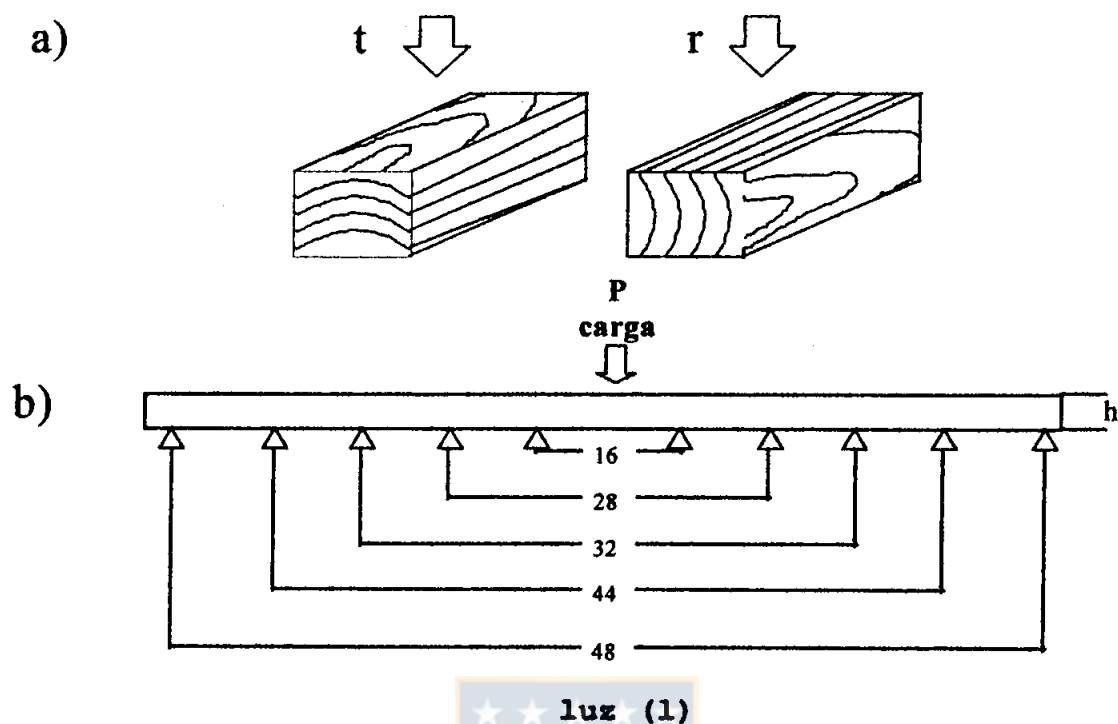


Figura 3. a) Dirección de las cargas para la determinación de Módulos de Elasticidad, t dirección, tangencial y r dirección radial. b) Condiciones de carga de viguetas a cinco luces l , de 16, 28, 32, 44 y 48cm, espesor h de 2cm.

Primero se obtuvo el módulo de elasticidad aparente MOE (a través de la ecuación.6), a las cinco relaciones l/h (8, 14, 16, 22, 24) para cada una de las viguetas.

Así para $l/h = 8$ se cargaron las 48 viguetas el mismo día en dirección radial y constante en la parte media de la luz, hasta llegar a un tercio del límite proporcional, estimado a partir de test preliminares. Posteriormente se dejaron en reposo por cuatro días, para luego realizar la carga de las 48 las viguetas en dirección tangencial para $l/h = 8$, igual procedimiento se realizó para $l/h = 14$. De la misma forma se

realizó, pero con períodos de reposo de dos días, para las relaciones $l/h = 18, 22$ y 26 .

Las lecturas de las cargas para $l/h = 8$, fueron efectuadas cada 10 Kgf, para $l/h = 14$ y 18 cada 5 Kgf y para $l/h = 22$ y 26 cada $2,5$ Kgf.

$$MOE = \frac{DP l^3}{4 DY b h^3} \quad \text{ec.6 (ver anexo 2)}$$

donde:

- MOE = módulo de elasticidad aparente en Kgf/cm^2
- DP = diferencia entre cargas superior e inferior en la región elástica de la curva carga-deflexión, en Kgf. (figura 3B del anexo 4)
- DY = diferencia entre deflexiones superior e inferior correspondientes a P, en cm.
- l = distancia entre los apoyos, en cm.
- b = altura de la vigueta, en cm.
- h = espesor de la viga, en cm.

Luego con los valores de MOE, se determinaron los valores de E y G para cada una de las viguetas, empleando la relación propuesta por Timoshenko citado por Wangaard 1964, que involucra una relación hiperbólica que linearizada queda de la forma:

$$\frac{(0.5) l/h)^2}{MOE} = \frac{0.3}{G} + \frac{1}{E} \left\{ \frac{0.5 l}{h} \right\} \quad \text{ec.7}$$

donde : MOE = módulo de elasticidad experimental
 para cada relación l/h.
 l/h = relación luz espesor.
 E = módulo de elasticidad real
 G = módulo de cizalle horizontal.

Esta metodología se detalla en el anexo 3.

3.6 Modelo matemático para Módulos de Elasticidad Real, radial y tangencial.

A través del software estadísticos SAS, se ajustó el siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y = a x_1 + b x_2 + \dots + i x_n$$

donde: a, b, ..., i = constantes de proporcionalidad
 x₁, x₂, ..., x_n = variables independientes.
 Y = E_r ó E_t ó E_{tot}

Se estimó el módulo de elasticidad real radial (E_r), tangencial (E_t) y el módulo de elasticidad real total (E_{tot}). El módulo de elasticidad real total se obtiene ingresando al modelo los valores de los ensayos en flexión radial y tangencial en conjunto.

Las variables utilizadas para la predicción fueron, módulo de elasticidad dinámico (E_d), velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en dirección longitudinal (V_L), densidad de referencia al 9% (D) y ancho de anillo de

crecimiento (AAC), quedando solo las más útiles para cada caso.



IV RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Velocidad de propagación con relación a la dirección de propagación.

Los resultados de las mediciones de velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido, según la dirección de propagación se muestran en la tabla 1, siendo V_L , V_R , V_T las velocidades medidas en dirección longitudinal, radial, y tangencial respectivamente.

TABLA 1. Parámetros estadísticos de la velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en las direcciones longitudinal (V_L), radial (V_R) y tangencial (V_T).

| Velocidad (m/s) | V_L | V_R | V_T |
|--------------------|--------|--------|--------|
| n | 52 | 52 | 52 |
| m | 4412,3 | 1850,4 | 1590,2 |
| d.e. | 329,0 | 115,0 | 81,0 |
| c.v. (%) | 7,4 | 6,2 | 5,0 |

n= tamaño de muestra m= media d.e.= desviación estandar
c.v.= coeficiente de variación.

Nota : al 9% de CH y densidad de referencia de 0,62 gr/cm³.

La velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en la dirección longitudinal (V_L), es significativamente mayor que en las otras dos direcciones, a la vez, la velocidad radial (V_R) es mayor que la tangencial (V_T), lo que se puede apreciar en la figura 4, cumpliéndose así que $V_L > V_R > V_T$, lo que concuerda con los resultados de otras investigaciones de velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en diferentes especies (Sandoz 1989, Bravo

1996, Kollmann 1968). Esto se puede representar con la siguiente relación $V_L/V_L: V_R/V_L:V_L/V_T = 1:2,38:2,77$, la que se comporta de manera similar a la encontrada por Bravo 1996, de $1:2,39:3,18$ para madera de *Pinus radiata* al 12% de CH y densidad de referencia de $0,465 \text{ gr/cm}^3$.

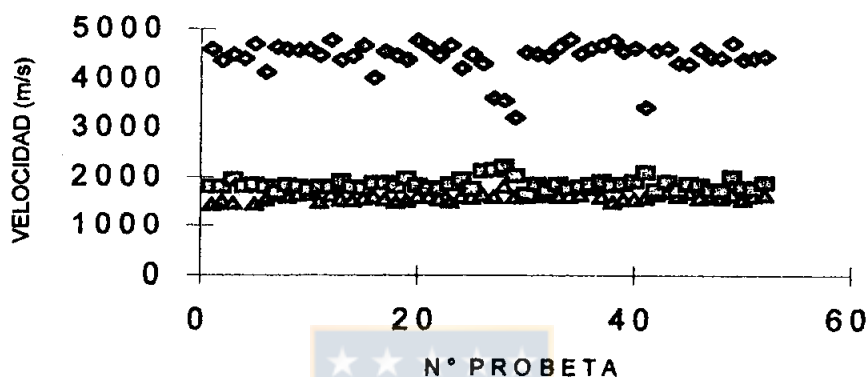


FIGURA 4. Velocidades longitudinales(♦), Velocidades radiales(■), Velocidades tangenciales(▲).

Este comportamiento se explica según Bucur 1984, citado por Bravo 1996, por la orientación de las fibras, paralelas al eje longitudinal que contribuyen a la transmisión de la onda en esa dirección, característica que no se presenta en los otros sentidos, pero que actúa en forma similar en dirección radial donde existen los radios leñosos, la dirección tangencial es la que presenta una menor velocidad ya que no existe una estructura, como en los casos anteriores, que facilite el tránsito de las ondas.

La irregularidad de los datos con respecto a su media, representada por el coeficiente de variación, se explica por la irregularidad del contenido de humedad de las probetas, ya que este influye sobre la velocidad de

propagación de ondas de ultrasonido, aumentando la velocidad para niveles bajos de humedad y disminuyendo para niveles superiores (James, 1961; James, 1962; Gerhards, 1975; Bucur y Sarem, s/a).

Para el análisis del módulo de elasticidad, se utilizó la velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en dirección longitudinal, ya que solo esta presentó relación con el módulo de elasticidad, puesto que en las otras direcciones están involucrados otros fenómenos.

4.2 Propiedades físicas y mecánicas.

La tabla 2, resume los valores estadísticos encontrados para las variables físicas y mecánicas medidas para la estimación del módulo de elasticidad real radial y tangencial.

TABLA 2. Valores estadísticos para las diferentes variables medidas.

| Parámetros estadísticos | Er (Kgf/cm ²) | Et (Kgf/cm ²) | Etot (Kgf/cm ²) | Ed (Kgf/cm ²) | D (gr/cm ³) | V _L (m/s) | AAC (cm) |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| n | 48 | 48 | 96 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| m | 199557,8 | 195531,5 | 197544,7 | 128147,1 | 0,62 | 4494,3 | 0,41 |
| d.e. | 35138,8 | 33271,0 | 34097,23 | 21469,8 | 0.071 | 163,3 | 0,2 |
| c.v.(%) | 17,6 | 17,0 | 17,3 | 16,7 | 11,5 | 3,6 | 47,2 |

Nota : el significado de n, m, d.e. y c.v. se describe en la tabla 1.

El módulo de elasticidad dinámico, Ed, (medido a través de la ec.5), es un 35% menor que los módulos de elasticidad real radial y tangencial medidos a través de los ensayos en flexión, se observa además una dispersión de los datos similar a la presentada por estos módulos de elasticidad

presentando un c.v. de 17,3% en promedio los primeros y un c.v. de 16,7% el módulo de elasticidad dinámico.

4.3 Estimación del Módulo de Elasticidad Real.

Los parámetros estudiados fueron E_r , E_t y E_{tot} , siendo tratadas como variables dependientes, en un análisis de regresión múltiple donde las variables independientes fueron V_L , E_d , D y AAC .

La tabla 3 muestra la matriz de correlación obtenida para el desarrollo del análisis de regresión múltiple.

TABLA 3. Matriz de correlación de Pearson.

| VARIABLES | E_r | E_t | V_L | E_d | AAC | D |
|-----------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|
| E_r | 1 | 0,946** | 0,655** | 0,817** | -0,641** | 0,798** |
| E_t | | 1 | 0,613** | 0,812** | -0,619** | 0,813** |
| V_L | | | 1 | 0,831** | -0,471** | 0,608** |
| E_d | | | | 1 | 0,549** | 0,944** |
| AAC | | | | | 1 | -0,521** |
| D | | | | | | 1 |

Nota: *:Significante al 5% **: significativa al 1% ns: no significativa

Las variables seleccionadas para la estimación de los tres módulos de elasticidad reales fueron D , AAC y E_d , las que explican en conjunto un 70,83%, 70,17% y un 71,07% la variación del E_r , E_t y E_{tot} , respectivamente, a un nivel de significancia del 1%, como se muestra en la tabla 4 (Tablas de análisis de varianza en Tabla 1A, 2A, 3A).

La variable velocidad longitudinal de pulsos de ultrasonido (VL), que presenta un coeficiente de correlación en forma individual con los módulos de elasticidad de 0,655 y 0,613 para E_r y E_t respectivamente (tabla 3), siendo eliminada para los tres modelos de Módulos de elasticidad por producir multicolinealidad.

TABLA 4. Funciones de regresión para módulos de elasticidad real y su estadística asociada.

| Modulo de Elasticidad real | Función | R2a | F** |
|----------------------------|--|--------|--------|
| RADIAL | $E_r=54584-117242D+0,724158E_d-49066AAC$ | 0,7083 | 39,047 |
| TANGENCIAL | $E_t=35851-196593D+0,432157E_d-41719AAC$ | 0,7017 | 37,852 |
| TOTAL | $E_{tot}=45217-156918D+0,578157E_d-45392AAC$ | 0,7107 | 78,777 |

Nota: **: significativa al 1%. R2a: coeficiente de correlación ajustado.

De acuerdo al análisis estadístico, las funciones de módulos de elasticidad generadas presentan una buena correlación entre módulos de elasticidad y las variables predictoras en cada caso, a un nivel de confianza de 99%. El análisis de varianza, para determinar la significancia de los modelos de regresión, mediante los valores de F, comprueba que son significativos en todas las regresiones (Tablas 1^a, 2^a, 3^a).

4.4 Verificación de los modelos obtenidos. Para la verificación de los modelos se utilizaron las 90 viguetas restantes del stock inicial que no fueron usadas para la

construcción de modelos, se descalificaron las probetas con defectos quedando un total de 88 para realizar el ensayo. Se calculó el módulo de elasticidad aparente (MOE), a través de la ecuación 8, para las 88 probetas, a cinco relaciones l/h, 43 se cargaron en forma radial y 45 en forma tangencial (en el anexo 4 se detalla esta metodología).

A las 88 probetas se les realizaron las mediciones de VL, Ed, AAC y D siguiendo la metodología descrita en el capítulo III, con el fin de ser utilizados en los modelos encontrados para luego hacer una comparación entre valores experimentales (obtenidos a través de ensayos mecánicos tradicionales) y predictos (obtenidos a través de las relaciones encontradas en el capítulo 4.3 y la ecuación 8).

$$MOE = \frac{E * [l/h]^2}{[l/h]^2 + C} \quad ec.8$$

donde:

- E = Módulo de elasticidad real, tangencial (Et) o radial (Er) o total (Etot), según corresponda.
- l/h = relación l/h.
- C = relación E/G * 1,2

Los valores de módulo de rigidez (G), involucrados en la determinación de la razón C, se obtienen a través de la metodología de la sección 3.5 ecuación 7 y se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 5. Datos para la obtención de la razón C.

| Parámetros estadísticos | G RADIAL (kgf/cm ²) | G TANGENCIAL (kgf/cm ²) |
|-------------------------|---------------------------------------|---|
| m | 3324,9 | 3586,7 |
| d.e. | 378,93 | 487,48 |
| c.v.(%) | 11,4 | 13,59 |
| razón C | E/3324,9 | E/3586,7 |

Nota : el significado de n, m, d.e. y c.v. se describe en la tabla 1.

Con los modelos encontrados, se obtuvo un módulo de elasticidad real para cada probeta, el que es reemplazado en E de la ecuación 8, con su l/h correspondiente y razón C tangencial o radial según sea el caso obtenidos del primer grupo de probetas (sección 3.5.1).

Para comparar los modelos obtenidos usando la técnica de ultrasonido, con otros sin esta técnica se ajustó una regresión lineal simple usando la densidad como variable explicativa, para E_r y E_t (utilizando los datos de la sección 3.3.2 y 3.5.1), obteniéndose los modelos:

$$E_r(D) = 393443 \cdot D - 43795 \quad r = 0,7983 \quad \text{ec.9}$$

y

$$E_t(D) = 379241 \cdot D - 39037 \quad r = 0,8127 \quad \text{ec.10}$$

donde:

| | | |
|-------|---|----------------------------------|
| E_r | = | módulo de elasticidad radial |
| E_t | = | módulo de elasticidad tangencial |
| D | = | densidad |
| R^2 | = | coeficiente de determinación. |

Posteriormente se utilizaron estos modelos en la ecuación 8.

Luego se obtuvo en valor absoluto la diferencia en porcentaje entre los valores estimados con la técnica de ultrasonido y los valores experimentales obtenidos a través de los ensayos en flexión. Igual procedimiento se realizó entre los valores estimados sin la técnica de ultrasonido y los valores experimentales obtenidos mediante los ensayos en flexión, estos resultados se presentan en las tablas 6 para ensayos realizados en dirección radial y en la tabla 7 para ensayos realizados en dirección tangencial.

Los valores experimentales de MOE y los valores de MOE predichos usando el modelo E_r presentan una diferencia de 7,88% (tabla 6), existiendo una correlación de 96,34% entre valores predichos y experimentales(figura 5). Para los mismos valores experimentales y valores predichos usando modelo E_{tot} se encontró una diferencia de 7,63% (tabla 6), existiendo la misma correlación anterior de 96,77%(figura 5).

No se encontró diferencia significativa entre las medias de los valores predichos usando los modelos E_r y E_{tot} .

TABLA 6. Promedios de valores experimentales y predictos de MOE radial y las correspondientes diferencias para cada relación l/h.

| l/h | MOEex. (1) (kgf/cm ²) | MOEt (2) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1)-(2) | est. de la diferencia | MOEtot (3) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1)-(3) | est. de la diferencia | MOED (4) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1)-(4) | est. de la diferencia |
|-----|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| 8 | 89706,46 | 89116,06 | 4,90 | n: 17 d.e: 3,22 c.v: 0,66 | 88266,52 | 5,03 | n: 17 d.e: 3,22 c.v: 0,64 | 86446,61 | 6,59 | n: 17 d.e: 5,15 c.v: 0,78 |
| 14 | 147524,36 | 137020,06 | 7,00 | n: 4 d.e: 4,61 c.v: 65,87 | 137506,30 | 6,91 | n: 4 d.e: 4,33 c.v: 0,63 | 144774,95 | 4,80 | n: 4 d.e: 2,54 c.v: 0,53 |
| 18 | 155400,23 | 149801,94 | 6,63 | n: 8 d.e: 4,53 c.v: 0,68 | 150445,50 | 5,97 | n: 8 d.e: 4,39 c.v: 0,74 | 161622,85 | 9,19 | n: 8 d.e: 6,05 c.v: 65,83 |
| 22 | 157483,80 | 157457,61 | 8,96 | n: 7 d.e: 6,24 c.v: 0,7 | 158094,14 | 8,85 | n: 7 d.e: 6,41 c.v: 0,72 | 167594,78 | 10,45 | n: 7 d.e: 8,12 c.v: 0,78 |
| 24 | 143389,53 | 129889,13 | 11,91 | n: 7 d.e: 5,73 c.v: 0,48 | 133715,24 | 11,40 | n: 7 d.e: 4,87 c.v: 0,43 | 160674,41 | 17,85 | n: 7 d.e: 20,93 c.v: 0,12 |
| m | | | 7,88 | | | 7,63 | | | 9,78 | |

(1) valores experimentales usando ec.6 sección 3.5.1.

(2) valores predictos usando ec.8 y modelo para Er.

(3) valores predictos usando ec.8 y modelo para Etot.

(4) valores predictos usando ec.8 y modelo E (D).

Nota: el significado de m, n, d.e y c.v se describe en la tabla 1

En cuanto a los valores predichos a través modelo Er(D) presentan una diferencia 9,78% con los valores experimentales, siendo esta un 2,02% en promedio mayor que las presentadas por los modelos que utilizan ultrasonido (tabla 6), aunque la correlación entre predichos y estimados es de 94,8% similar a la de los modelos que utilizan ultrasonido (figura 5).

En la figura 5 se muestran gráficamente la relación entre MOE experimentales y predichos, donde se aprecia que la recta ajustada para Er y Etot prácticamente se superponen y la del modelo Er(D) se dibuja sobre ellas.

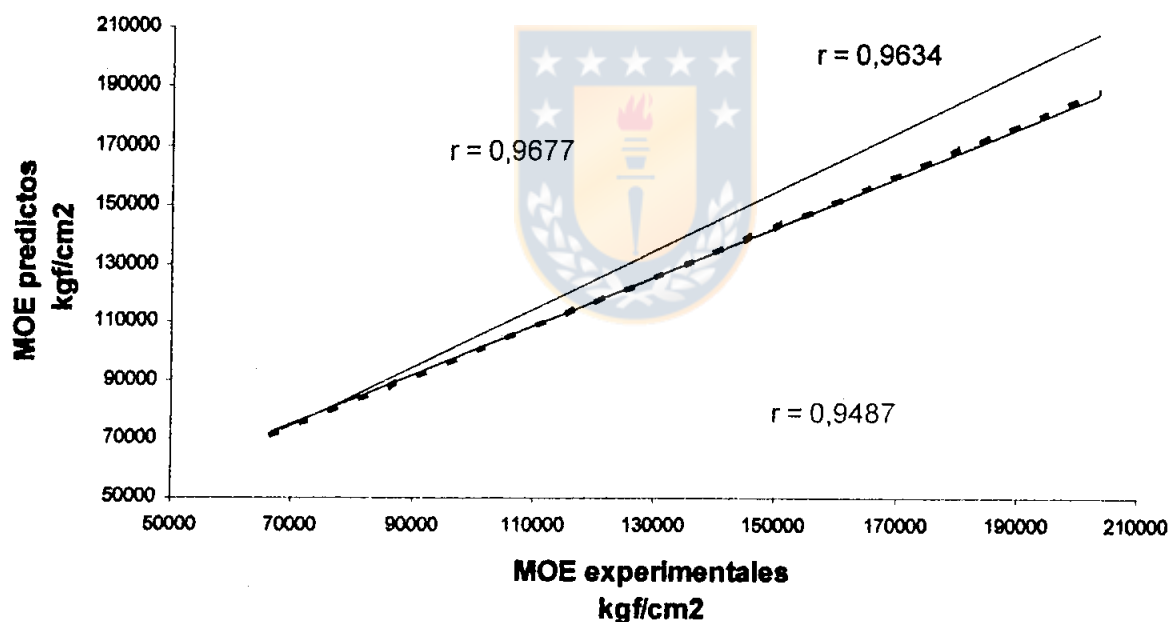


FIGURA 5. Regresiones para valores de MOE experimental versus MOE predichos, en viguetas cargadas en dirección radial, con modelos: Er (—) y $r=0,9634$; Etot (---) y $r=0,9677$; ED (—·—) y $r=0,9487$ (r = coeficiente de correlación).

Los valores experimentales de MOE usando la ecuación 6 y los valores de MOE predictos usando la ec.8 y modelo Et presentan una diferencia de 7,24% (tabla 7) existiendo una correlación de 95,87% entre valores predictos y experimentales (figura 6). Para los mismos valores experimentales y valores predictos usando ec.8 y modelo Etot se encontró una diferencia de 7,10% (tabla 7) existiendo una alta correlación de un 95,66% (figura 6).

No se encontró diferencia significativa entre las medias de los valores predictos usando los modelos Et y Etot.

Los valores predictos a través modelo Et(D) presentan una diferencia 9.77% con los valores experimentales, siendo esta un 2,6% en promedio mayor que las presentadas por los modelos que utilizan ultrasonido (tabla 7), aunque la correlación entre predictos y estimados es de 93,09% similar a la de los modelos que utilizan ultrasonido que presentan un 95% en promedio.

TABLA 7. Promedios de valores experimentales y predictos de MOE tangencial y las correspondientes diferencias para cada relación l/h.

| l/h | MOEex. (1) (kgf/cm ²) | MOEt (2) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1) - (2) | est. de la diferencia | MOEtot (3) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1) - (3) | est. de la diferencia | MOED (4) (kgf/cm ²) | dif. (%) (1) - (4) | est. de la diferencia |
|-----|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 8 | 94731,61 | 90937,79 | 7,72 | n: 17 d.e: 4,48 c.v: 0,58 | 91709,03 | 7,82 | n: 17 d.e: 4,74 c.v: 0,61 | 89283,08 | 7,34 | n: 17 d.e: 4,4 c.v: 0,6 |
| 14 | 146474,64 | 140915,41 | 7,36 | n: 5 d.e: 2,68 c.v: 0,36 | 141824,86 | 6,63 | n: 5 d.e: 2,62 c.v: 0,4 | 141018,94 | 9,97 | n: 5 d.e: 2,77 c.v: 0,28 |
| 18 | 139486,85 | 131859,93 | 6,70 | n: 6 d.e: 4,37 c.v: 0,65 | 132026,93 | 6,10 | n: 6 d.e: 3,85 c.v: 0,63 | 138380,89 | 12,23 | n: 6 d.e: 10,92 c.v: 0,89 |
| 22 | 158330,22 | 157216,53 | 6,88 | n: 10 d.e: 5,58 c.v: 0,81 | 159604,69 | 7,43 | n: 10 d.e: 5,81 c.v: 0,78 | 152357,06 | 9,50 | n: 10 d.e: 7,84 c.v: 0,83 |
| 24 | 152532,22 | 153664,38 | 7,52 | n: 7 d.e: 3,63 c.v: 0,48 | 153149,19 | 7,55 | n: 7 d.e: 4,01 c.v: 0,53 | 156273,24 | 9,79 | n: 7 d.e: 5,67 c.v: 0,58 |
| m | | | 7,24 | | | 7,10 | | | 9,77 | |

(1) valores experimentales usando ec.6 sección 3.5.1.

(2) valores predictos usando ec.8 y modelo para Et.

(3) valores predictos usando ec.8 y modelo para Etot.

(4) valores predictos usando ec.8 y modelo E (D).

Nota: el significado de m, n, d.e y c.v se describe en la tabla 1

En la figura 6 se muestran gráficamente la relación entre MOE experimentales y predictos, donde se aprecia que la recta ajustada para E_r y E_{tot} prácticamente se superponen y la del modelo $E_r(D)$ se dibuja bajo ellas.

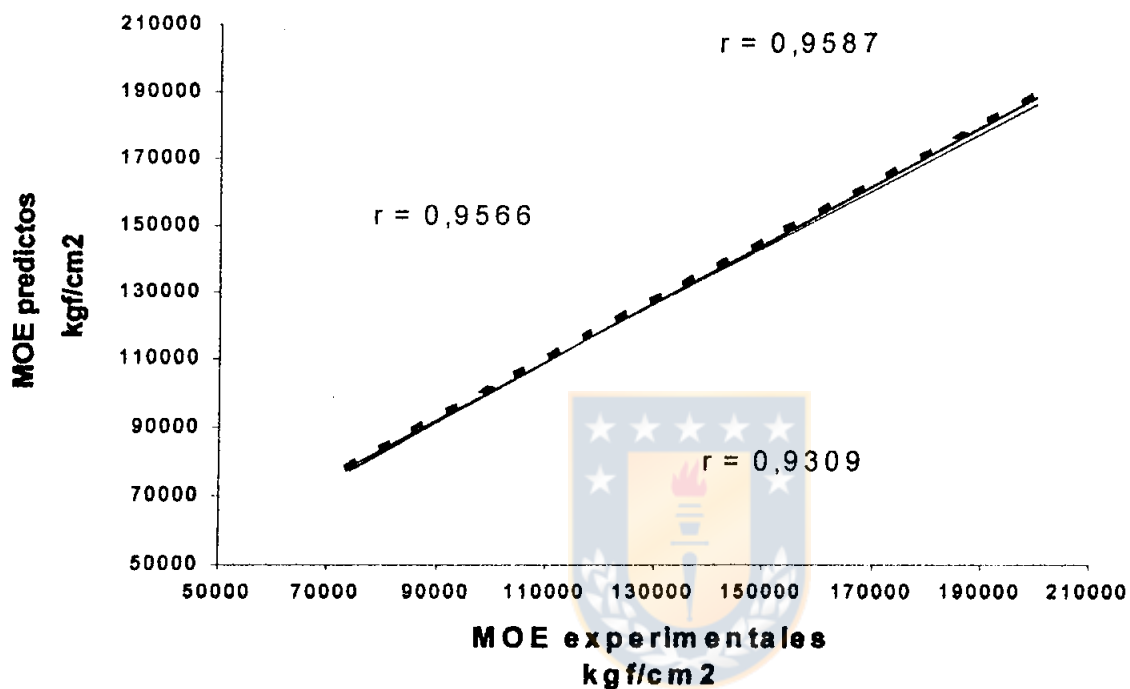


FIGURA 6. Regresiones para valores de MOE experimental versus MOE predictos, en viguetas cargadas en dirección tangencial, .con modelos: E_t (———) y $r=0,9587$; E_{tot} (----) y $r=0,9566$; E_{den} (.....) y $r=0,9309$ (r coeficiente de correlación).

V CONCLUSIONES

1. Las velocidades de propagación de pulsos de ultrasonido medidas en dirección longitudinal, radial y tangencial, a una densidad de 0.62 gr/cm^3 y 9% de CH, siguen la relación $V_L/V_L:V_R/V_L:V_T/V_L=1:2.38:2.77$, lo que coincide con resultados obtenidos por Bravo 1996.
2. Al estimar el módulo de elasticidad radial, tangencial y total se obtienen las siguientes correlaciones: $R^2a=0,708$ para E_r , $R^2a=0,702$ para E_t y $R^2a=0.711$ para E_{tot} , a través de la densidad (D), ancho de anillo de crecimiento (AAC) y módulo de elasticidad dinámico (E_d).
3. Las variables V_L , AAC y E_d en conjunto son efectivas para estimar los módulos de elasticidad radial y tangencial.
4. Ambos modelos pueden ser utilizados tanto para la determinación de módulos de elasticidad real, como para la determinación de módulos de elasticidad aparente.
5. El modelo E_{tot} puede ser utilizado tanto para la estimación de E_r como E_t , sin que se presenten diferencias significativas.
6. Los valores predictos con los modelos que utilizan en conjunto las variables E_d , D y AAC, presentan menores diferencias con valores experimentales que los valores predictos con los modelos que utilizan solo la variable densidad.

VI RESUMEN

Con el fin de aplicar la técnica de ultrasonido en la estimación del módulo de elasticidad de la madera (E), se utilizaron viguetas y probetas de *Pinus radiata* D. Don de 52 años de edad, a un 9% de contenido de humedad y 0,62 gr/cm³ de densidad promedio. Además se usaron las variables densidad (D) y ancho de anillo de crecimiento (AAC) para la estimación.

Se midió el módulo de elasticidad de la madera (E) en dirección radial y tangencial, a través de ensayos en flexión estática en las viguetas y velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido en dirección longitudinal (VL), módulo de elasticidad dinámico (Ed), ancho de anillo de crecimiento (AAC) y densidad (D) en las probetas.

La estimación se realizó a través del modelo lineal de la forma $y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3$, este modelo resultó ser confiable, de acuerdo a sus estadísticas asociadas.

Las variables que mejor explican la variación del módulo de elasticidad de la madera (E), en dirección radial y tangencial son densidad (D), módulo de elasticidad dinámico (Ed) y ancho de anillo de crecimiento (AAC) en conjunto.

VII SUMMARY

With the purpose of applying the stress waves technique to get the estimation of wood modulus of elasticity, it was used samples of *Pinus radiata* D. Don of 52 years old, at a 9% of moisture content and 0,62 gr/cm³ as an average of density. Besides there were used variables like density and annual ring width. It was measured the modulus of elasticity according to tangential and radial direction and also through static bending test applied to the samples and longitudinal speed of sound transmission, stress waves modulus (Esw), annual ring width and density.

The estimation was obtained from the lineal model of the shape $y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3$, this model was trustful, according to related statistics.

The variables that better explain the modulus of elasticity variation to tangential and radial direction, are together, density, stress waves modulus (Esw) and annual ring width.

VIII BIBLIOGRAFIA

- 1.Bravo, I. 1996. Evaluación preliminar de la anisotropía y determinación del Módulo de Elasticidad de la Madera de *Pinus radiata* D.Don por ultrasonido. Seminario de titulación Ingeniería Civil en Industrias Forestales, Universidad del Bío-Bío, Concepción.
- 2.Bucur, V., Archer, R. 1984. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Sci. And Technol.*18: 255-265.
- 3.Bucur, V., Sarem M.,s/a. An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood.
- 4.Campos, A. 1990. Módulo de Elasticidad Dinámico y Esfuerzo de Compresión paralelo a la fibra en ciertas coníferas canadienses. *Ciencia e Investigación Forestal.*4(2), Junio 1990.
- 5.Clark J.A, Vergara C. 1994. Determinación de algunas Propiedades Mecánicas de un rodal de *Pinus radiata* de 52 años de Edad, Seminario de Titulación Ing.Ejecución en Maderas, Universidad del Bio-Bío.
- 6.Gerhards, C(a). 1975. Stress Wave Speed and MOE of Sweetgum Ranging From 150 to 15 percent MC, *Forest Products Journal.*25(4): 51-57.

7. Gerhards, C(b). 1982. Longitudinal stress waves for lumber stress grading: factors affecting applications: state of the art. Forest Products Journal. 32(2): 20-25.
8. Groom, L. and Polensek, A. 1987. Nondestructive Prediction of Load-Deflection Relations for Lumber, Wood and Fiber Sci. 19(3):298-312.
9. Instituto Nacional de Normalización. 1988. Nch 176/2 Madera. Determinación de la densidad. Santiago, Chile.
10. James, W. 1961. Effect of temperature and moisture content on: Internal friction and speed of sound in Douglas-fir. Forest Products Journal. 11(9): 383-390.
11. James, W. 1962. Dinamic strenght and elastic properties of wood. Forest Products Journal. 12(6).
12. Kollmann, F., Cote, W. 1968. Principles of wood science and technology in solid wood. Springer-Verlag.
13. Mc Donald, K. A. And Szymani, R. 1981. Defect detection in lumber: state of the art, Forest Products Journal. 31(11): 34-44.
14. Muzzioli, L. 1961. Los Ultrasonidos y algunas de sus mas interesantes aplicaciones, Universidad de Concepción.

15. Perez, V. 1991. Manual de Construcción en Madera, Instituto Forestal.
16. Ross, R.J. and Pellerin, R.F(a). 1991. NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber, Forest Products Journal. 41(6): 57-59.
17. Ross, R.J. and Pellerin, R.F(b). 1991. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. Gen Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
18. Sandoz, J.L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound, Wood Sci. And Technology. 23:95-108.
19. Vázquez, Ma Angélica. 1982. Análisis de Aspectos sobre Ensayos no destructivos para Maderas, Trabajo de Titulación Ing. Ejecución en Maderas, Universidad del Bio-Bío, Concepción.
20. Wangaard, F. 1964. Elastic deflection of wood-fiberglass composite beams. Forest Products Journal. Junio 1964.

IX APENDICES

Tabla 1A. Tabla de análisis de varianza para módulo de elasticidad radial.

| Fuente de variación | g.l | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Valor F | Pr>F | R ² | R ² a* |
|---------------------|-----|-------------------|----------------|---------|--------|----------------|-------------------|
| Modelo | 3 | 42186804495 | 14062268165 | 39,047 | 0,0001 | 0,7269 | 0,708 |
| Error | 44 | 15845904186 | 360134186,05 | | | | |
| Total corregido | 47 | 58032708682 | | | | | |

R²= coeficiente de correlación. R²a*= coeficiente de correlación ajustado

Tabla 2A. Tabla de análisis de varianza para módulo de elasticidad tangencial.

| Fuente de variación | g.l | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Valor F | Pr>F | R ² | R ² a* |
|---------------------|-----|-------------------|----------------|---------|--------|----------------|-------------------|
| Modelo | 3 | 37497833080 | 12499277693 | 37,852 | 0,0001 | 0,7207 | 0,702 |
| Error | 44 | 14529420399 | 330214099,98 | | | | |
| Total corregido | 47 | 52027253480 | | | | | |

R²= coeficiente de correlación. R²a*= coeficiente de correlación ajustado

Tabla 3A. Tabla de análisis de varianza para módulo de elasticidad total.

| Fuente de variación | g.l | Suma de cuadrados | Cuadrado Medio | Valor F | Pr>F | R ² | R ² a* |
|---------------------|-----|-------------------|----------------|---------|--------|----------------|-------------------|
| Modelo | 3 | 79500569072 | 26500189691 | 78,78 | 0,0001 | 0,7198 | 0,711 |
| Error | 92 | 30948460980 | 336396315 | | | | |
| Total corregido | 95 | 110449030053 | | | | | |

R²= coeficiente de correlación. R²a*= coeficiente de correlación ajustado

TABLA 4A. Base de datos para la construcción de modelos matemáticos para módulos de elasticidad Real, Radial y Tangencial.

| Probeta | Er (kgf/cm ²) | Et (kgf/cm ²) | Ed (kgf/cm ²) | V _L (m/s) | D (gr/cm ³) | AAC (cm) | θ grados |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
| 1 | 203904,06 | 191948,49 | 125629,60 | 4580,85 | 0,587 | 0,45 | 2,00 |
| 2 | 191576,30 | 183506,27 | 103139,63 | 4352,00 | 0,534 | 0,48 | 2,75 |
| 3 | 219169,54 | 201465,20 | 114054,64 | 4477,89 | 0,558 | 0,80 | 1,95 |
| 4 | 204786,57 | 208332,05 | 111405,96 | 4389,69 | 0,567 | 0,57 | 4,50 |
| 5 | 195884,44 | 178332,35 | 136286,90 | 4673,91 | 0,612 | 0,48 | 1,70 |
| 6 | 193423,29 | 188124,78 | 108960,90 | 4111,54 | 0,632 | 0,47 | 2,05 |
| 7 | 237836,51 | 233094,73 | 151262,15 | 4617,02 | 0,696 | 0,22 | 1,50 |
| 8 | 213349,41 | 197077,99 | 143259,44 | 4563,44 | 0,675 | 0,32 | 1,75 |
| 9 | 220696,44 | 209388,53 | 135172,24 | 4557,45 | 0,638 | 0,33 | 1,30 |
| 10 | 257265,70 | 257267,32 | 155551,97 | 4572,04 | 0,730 | 0,21 | 1,85 |
| 11 | 172870,63 | 159992,48 | 118514,29 | 4454,17 | 0,586 | 0,34 | 2,60 |
| 12 | 239230,77 | 268244,36 | 163324,86 | 4762,22 | 0,706 | 0,20 | 1,85 |
| 13 | 167014,73 | 153019,95 | 103965,43 | 4369,39 | 0,534 | 0,52 | 3,00 |
| 14 | 193365,74 | 191852,66 | 116313,91 | 4433,33 | 0,581 | 0,20 | 2,45 |
| 15 | 227894,40 | 230142,21 | 160610,62 | 4652,17 | 0,728 | 0,22 | 3,35 |
| 16 | 124005,78 | 129237,39 | 79341,05 | 4005,66 | 0,485 | 0,54 | 11,75 |
| 17 | 198197,55 | 188931,09 | 123690,23 | 4536,17 | 0,590 | 0,43 | 1,45 |
| 18 | 161428,11 | 173082,14 | 121848,86 | 4453,76 | 0,603 | 0,68 | 5,10 |
| 19 | 131490,70 | 136403,63 | 88943,03 | 4369,07 | 0,457 | 0,85 | 1,95 |
| 20 | 257913,99 | 228998,14 | 163986,58 | 4751,11 | 0,713 | 0,29 | 3,30 |
| 21 | 214279,72 | 219815,59 | 144347,79 | 4604,35 | 0,668 | 0,35 | 1,55 |
| 22 | 210360,83 | 217909,96 | 133458,72 | 4451,06 | 0,661 | 0,26 | 2,45 |
| 23 | 159654,22 | 152097,77 | 115487,09 | 4652,17 | 0,523 | 0,36 | 7,20 |
| 24 | 115031,79 | 111456,72 | 91210,15 | 4204,04 | 0,506 | 1,01 | 3,10 |
| 25 | 192049,77 | 174817,84 | 113325,74 | 4469,47 | 0,557 | 0,31 | 2,15 |
| 26 | 152663,54 | 147420,47 | 99997,59 | 4276,77 | 0,536 | 0,66 | 7,25 |
| 27 | 210167,61 | 209804,04 | 131046,52 | 4506,38 | 0,633 | 0,25 | 1,75 |
| 28 | 265852,97 | 244994,41 | 129027,90 | 4514,89 | 0,621 | 0,24 | 1,65 |
| 29 | 164362,17 | 165115,54 | 112432,02 | 4437,50 | 0,560 | 0,37 | 3,60 |
| 30 | 214830,24 | 203760,27 | 154425,96 | 4613,04 | 0,712 | 0,11 | 1,50 |
| 31 | 253584,14 | 228536,33 | 173876,54 | 4775,28 | 0,748 | 0,22 | 1,40 |
| 32 | 172498,02 | 175793,02 | 117969,62 | 4490,53 | 0,574 | 0,24 | 2,50 |
| 33 | 195882,42 | 203893,20 | 125902,58 | 4588,37 | 0,587 | 0,45 | 1,50 |
| 34 | 225758,17 | 220974,74 | 154740,97 | 4650,55 | 0,702 | 0,30 | 2,80 |
| 35 | 192572,97 | 176282,58 | 127467,10 | 4736,36 | 0,557 | 0,42 | 2,20 |
| 36 | 225688,76 | 219996,25 | 139898,02 | 4533,33 | 0,668 | 0,42 | 3,00 |
| 37 | 237791,04 | 233204,58 | 155881,34 | 4595,70 | 0,724 | 0,39 | 1,75 |
| 38 | 208501,22 | 214760,13 | 135146,13 | 4548,94 | 0,641 | 0,43 | 1,20 |
| 39 | 217930,61 | 208615,25 | 138083,88 | 4580,65 | 0,646 | 0,40 | 2,40 |
| 40 | 176068,81 | 178863,26 | 106196,00 | 4295,65 | 0,565 | 0,28 | 2,25 |
| 41 | 142805,89 | 144238,28 | 118953,51 | 4272,00 | 0,639 | 0,96 | 2,80 |
| 42 | 207430,23 | 210416,89 | 150354,28 | 4575,00 | 0,705 | 0,44 | 2,25 |
| 43 | 242587,36 | 223783,40 | 131627,62 | 4408,25 | 0,664 | 0,27 | 2,15 |
| 44 | 207584,95 | 204745,62 | 115746,39 | 4387,37 | 0,590 | 0,32 | 1,65 |
| 45 | 214772,96 | 218102,32 | 155544,27 | 4685,71 | 0,695 | 0,61 | 2,25 |
| 46 | 169958,40 | 160666,53 | 110502,51 | 4367,68 | 0,568 | 0,47 | 2,95 |
| 47 | 213810,31 | 214652,18 | 127679,10 | 4391,11 | 0,650 | 0,35 | 3,55 |
| 48 | 162993,17 | 162355,20 | 115468,04 | 4429,21 | 0,577 | 0,41 | 2,30 |
| m | 199557,85 | 194906,54 | 128147,08 | 4494,26 | 0,62 | 0,41 | 2,73 |
| d.e. | 35138,85 | 33894,44 | 21469,84 | 163,27 | 0,07 | 0,20 | 1,82 |
| c.v. (%) | 17,61 | 17,39 | 16,75 | 3,63 | 11,52 | 47,25 | 66,54 |

Nota: el significado de m, d.e., y c.v. se describe en la tablal.

θ : fibra revirada

TABLA 5A. Base de datos para la obtención del módulo de elasticidad aparente a l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos Er, Etot y DE, para probetas cargadas en dirección radial.

| l/h | probeta | AAC | VL | D | Ed | θ | Er | Etot | ErD | MOEr | MOEtot | MOED |
|-----|---------|------|---------|------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 8 | r2,01 | 0,34 | 4460,00 | 0,59 | 119342,51 | 2,4 | 193378,00 | 191184,26 | 187771,79 | 92502,78 | 91997,82 | 91200,26 |
| | r2,02 | 0,26 | 5373,49 | 0,51 | 150363,66 | - | 210754,85 | 200647,54 | 157197,66 | 96300,92 | 94134,20 | 83328,57 |
| | r2,03 | 0,71 | 4173,08 | 0,51 | 91143,00 | 4,25 | 145846,26 | 146158,95 | 158209,64 | 80026,87 | 80120,93 | 83612,08 |
| | r2,04 | 0,80 | 4579,31 | 0,44 | 93292,44 | 14,0 | 134057,68 | 131324,91 | 127915,61 | 76343,20 | 75449,10 | 74311,20 |
| | r2,05 | 0,46 | 4489,80 | 0,65 | 134055,38 | 19 | 205822,48 | 204438,73 | 212879,00 | 95257,84 | 94960,37 | 96742,01 |
| | r2,06 | 0,49 | 4708,51 | 0,56 | 127501,89 | 16,5 | 189215,16 | 185402,77 | 178178,10 | 91539,41 | 90637,75 | 88876,02 |
| | r2,07 | 0,46 | 4623,91 | 0,56 | 121642,04 | 13,0 | 185783,01 | 182472,08 | 175796,34 | 90728,53 | 89931,63 | 88279,42 |
| | r2,08 | 0,97 | 4673,68 | 0,40 | 88306,29 | 11,0 | 117680,04 | 114700,76 | 112240,62 | 70736,94 | 69649,50 | 68734,67 |
| | r2,09 | 0,30 | 4458,33 | 0,63 | 128218,55 | 11,0 | 206906,85 | 205029,47 | 205180,51 | 95489,46 | 95087,63 | 95120,10 |
| | r2,10 | 0,44 | 4500,00 | 0,65 | 134434,74 | 19,0 | 206604,04 | 205072,79 | 212439,33 | 95424,91 | 95096,95 | 96651,10 |
| | r2,11 | 0,42 | 4793,41 | 0,49 | 115505,36 | 15,0 | 175438,78 | 170317,34 | 150233,01 | 88189,16 | 86875,99 | 81329,94 |
| | r2,12 | 0,46 | 4484,62 | 0,55 | 113299,02 | 14,0 | 178951,14 | 176651,73 | 173638,56 | 89067,94 | 88494,61 | 87731,94 |
| | r2,13 | 0,55 | 4610,64 | 0,55 | 119305,46 | 8,0 | 178739,11 | 175803,54 | 172820,26 | 89015,38 | 88281,24 | 87522,56 |
| | r2,14 | 0,27 | 4371,15 | 0,69 | 133715,03 | 10,0 | 218656,69 | 217997,75 | 226313,90 | 97917,81 | 97785,45 | 99424,24 |
| | r2,15 | 0,61 | 4950,00 | 0,57 | 141959,43 | 11,0 | 194188,49 | 188879,28 | 179821,93 | 92687,83 | 91460,73 | 89283,13 |
| | r2,16 | 0,57 | 5312,64 | 0,41 | 119279,07 | 7,0 | 161452,66 | 153225,01 | 119319,92 | 84509,18 | 82198,87 | 71326,18 |
| | r2,17 | 0,47 | 4628,87 | 0,54 | 117259,46 | 10,0 | 179626,19 | 176148,38 | 167432,04 | 89234,85 | 88368,11 | 86119,00 |
| 14 | m | 0,50 | 4658,32 | 0,55 | 120507,26 | 10,89 | 181358,91 | 177967,96 | 171611,07 | 89116,06 | 88266,52 | 86446,61 |
| | d.e. | 0,19 | 309,95 | 0,08 | 17220,80 | 5,38 | 27989,51 | 27978,05 | 32513,88 | 7439,74 | 7548,15 | 8768,34 |
| | c.v.(%) | 37,4 | 6,7 | 15,1 | 14,3 | 49,4 | 15,4 | 15,7 | 18,9 | 8,3 | 8,6 | 10,1 |
| | r2,18 | 0,43 | 4092,59 | 0,60 | 102679,05 | 7,5 | 178202,06 | 179295,27 | 192816,39 | 134174,14 | 134792,96 | 142294,58 |
| | r2,19 | 0,43 | 4000,00 | 0,58 | 94657,56 | 12,0 | 169978,15 | 171404,95 | 184547,18 | 129458,18 | 130284,15 | 137739,87 |
| | r2,20 | 0,25 | 4115,38 | 0,71 | 122653,56 | 2,75 | 214284,44 | 216126,89 | 235723,22 | 153654,96 | 154600,01 | 164374,82 |
| | r2,21 | 0,57 | 4352,94 | 0,57 | 109431,55 | 3,5 | 172286,74 | 171515,65 | 179114,09 | 130792,98 | 130348,10 | 134690,53 |
| | m | 0,42 | 4140,23 | 0,61 | 107355,43 | 6,44 | 183687,85 | 184585,69 | 198050,22 | 137020,06 | 137506,30 | 144774,95 |
| | d.e. | 0,13 | 150,33 | 0,07 | 11852,53 | 4,25 | 20689,66 | 21349,43 | 25739,45 | 11266,14 | 11589,60 | 13434,97 |
| | c.v.(%) | 30,8 | 3,6 | 10,6 | 11,0 | 66,1 | 11,3 | 11,6 | 13,0 | 8,2 | 8,4 | 9,3 |

| l/h | probeta | AAC | VL | D | Ed | θ | Er | Etot | ErD | MOEr | MOEtot | MOED |
|-----|---------|------|---------|------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 18 | r2,22 | 0,46 | 3843,14 | 0,78 | 116969,21 | 5,5 | 207803,90 | 213873,86 | 261873,43 | 168743,38 | 172724,03 | 202734,16 |
| | r2,23 | 0,34 | 4705,88 | 0,64 | 144489,08 | 5,0 | 217723,80 | 213894,48 | 208032,83 | 175226,35 | 172737,48 | 168894,30 |
| | r2,24 | 0,31 | 4445,65 | 0,69 | 139654,60 | 2,0 | 221678,57 | 220571,22 | 228936,38 | 177778,88 | 177065,98 | 182416,67 |
| | r2,25 | 0,49 | 3923,08 | 0,57 | 88751,05 | 4,75 | 161380,98 | 163282,98 | 178777,07 | 136790,55 | 138154,63 | 149087,12 |
| | r2,26 | 0,81 | 3798,17 | 0,54 | 78783,00 | 9,0 | 134703,08 | 138065,63 | 166988,04 | 117128,05 | 119662,15 | 140797,83 |
| | r2,27 | 0,25 | 3884,62 | 0,60 | 93047,46 | 6,0 | 180568,19 | 182538,02 | 194195,33 | 150330,65 | 151693,50 | 159658,11 |
| | r2,28 | 0,40 | 4313,73 | 0,67 | 127790,36 | 5,0 | 206483,13 | 206657,66 | 221264,82 | 167871,42 | 167986,76 | 177512,67 |
| | r2,29 | 1,08 | 4505,26 | 0,44 | 90244,64 | 4,25 | 118326,20 | 117038,20 | 127810,79 | 104546,27 | 103539,52 | 111881,91 |
| | m | 0,52 | 4177,44 | 0,62 | 109666,17 | 5,19 | 181083,48 | 181990,26 | 198484,84 | 149801,94 | 150445,50 | 161622,85 |
| | d.e. | 0,28 | 355,22 | 0,11 | 25460,42 | 2,0 | 39329,51 | 38968,52 | 41316,15 | 27773,65 | 27542,23 | 28022,26 |
| 22 | c.v.(%) | 54,8 | 8,5 | 17,1 | 23,2 | 37,6 | 21,7 | 21,4 | 20,8 | 18,5 | 18,3 | 17,3 |
| | r2,30 | 0,43 | 4198,02 | 0,63 | 112749,48 | 5,0 | 188815,25 | 189460,51 | 203136,46 | 165511,65 | 166007,26 | 176413,91 |
| | r2,31 | 0,45 | 3853,21 | 0,71 | 107571,05 | 5,0 | 193732,87 | 198513,53 | 235845,88 | 169278,21 | 172916,80 | 200571,82 |
| | r2,32 | 0,89 | 4230,77 | 0,48 | 87013,98 | 7,0 | 129838,82 | 129958,69 | 143834,54 | 118377,59 | 118477,22 | 129901,82 |
| | r2,33 | 0,19 | 4435,64 | 0,69 | 139152,87 | 4,75 | 227571,43 | 226099,41 | 229184,30 | 194555,83 | 193478,93 | 195733,45 |
| | r2,34 | 0,26 | 3956,44 | 0,60 | 96372,94 | 4,0 | 182475,89 | 183953,05 | 193833,07 | 160620,27 | 161763,67 | 169354,71 |
| | r2,35 | 0,25 | 4209,80 | 0,60 | 107498,68 | 2,0 | 189927,57 | 189393,08 | 190320,53 | 166365,73 | 165955,49 | 166667,16 |
| | r2,36 | 0,59 | 3981,65 | 0,49 | 79403,32 | 5,0 | 140888,37 | 141579,41 | 149518,88 | 127494,00 | 128059,63 | 134520,58 |
| | m | 0,44 | 4123,65 | 0,60 | 104251,76 | 4,68 | 179035,74 | 179851,10 | 192239,09 | 157457,61 | 158094,14 | 167594,78 |
| | d.e. | 0,24 | 201,26 | 0,09 | 19529,98 | 1,49 | 33350,12 | 33270,07 | 35495,29 | 26125,64 | 26080,80 | 27311,98 |
| 24 | c.v.(%) | 56,0 | 4,9 | 15,0 | 18,7 | 31,9 | 18,6 | 18,5 | 18,5 | 16,6 | 16,5 | 16,3 |
| | r2,37 | 0,49 | 3913,04 | 0,53 | 82001,73 | 5,5 | 151617,06 | 152915,09 | 162906,90 | 138462,94 | 139544,70 | 147818,34 |
| | r2,38 | 0,81 | 3672,41 | 0,63 | 86744,73 | 1,0 | 151780,84 | 157748,32 | 204455,83 | 138599,52 | 143558,59 | 181237,65 |
| | r2,39 | 1,12 | 3248,00 | 0,42 | 45486,91 | 4,0 | 82406,56 | 87277,23 | 122624,91 | 78360,44 | 82751,81 | 113875,30 |
| | r2,40 | 0,35 | 3721,74 | 0,68 | 96679,34 | 4,0 | 187846,75 | 192806,16 | 225601,93 | 168065,15 | 172024,03 | 197660,82 |
| | r2,41 | 0,66 | 3209,68 | 0,57 | 59540,08 | 3,5 | 131690,76 | 138557,91 | 179273,12 | 121652,54 | 127489,48 | 161169,02 |
| | r2,42 | 0,44 | 3767,86 | 0,72 | 104197,09 | 4,75 | 193012,19 | 198604,78 | 239486,09 | 172188,02 | 176625,06 | 208238,19 |
| | r2,43 | 1,05 | 3766,67 | 0,43 | 61535,20 | 5,00 | 97509,93 | 99897,73 | 123606,77 | 91895,28 | 94013,04 | 114721,57 |
| | m | 0,70 | 3614,20 | 0,57 | 76597,87 | 3,96 | 142266,30 | 146829,60 | 179707,93 | 129889,13 | 133715,24 | 160674,41 |
| | d.e. | 0,30 | 273,51 | 0,12 | 21536,35 | 1,47 | 41890,43 | 42364,04 | 46512,40 | 35502,50 | 35711,78 | 37683,99 |
| 24 | c.v.(%) | 43,1 | 7,6 | 20,8 | 28,1 | 37,2 | 29,4 | 28,9 | 25,9 | 27,3 | 26,7 | 23,5 |

Nota: θ: fibra revirada.

TABLA 6A. Base de datos para la obtención del módulo de elasticidad aparente a l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos Et, Etot y Ed, para probetas cargadas en dirección tangencial.

| l/h | probet | AAC | VL | D | Ed | θ | Et | Etot | Etd | MOEt | MOEtot | MOED |
|-----|----------|------|---------|------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 8 | t2.01 | 0,66 | 3760,71 | 0,58 | 93810,18 | 13,0 | 162881,13 | 160507,73 | 180922,78 | 87973,13 | 87276,10 | 92981,04 |
| | t2.02 | 0,38 | 4046,15 | 0,49 | 102472,79 | 7,0 | 161399,06 | 164730,90 | 148308,05 | 87538,97 | 88509,93 | 83539,51 |
| | t2.03 | 0,28 | 4911,11 | 0,63 | 159476,73 | 3,1 | 217561,75 | 224014,27 | 201401,79 | 101790,94 | 103181,47 | 98107,89 |
| | t2.04 | 0,46 | 4450,00 | 0,52 | 86491,68 | 10,0 | 156814,66 | 156365,17 | 159306,04 | 86172,61 | 86036,70 | 86919,59 |
| | t2.05 | 0,45 | 5053,19 | 0,53 | 146736,16 | 7,5 | 183701,83 | 192009,09 | 160064,53 | 93709,60 | 95824,47 | 87144,89 |
| | t2.06 | 0,58 | 4444,00 | 0,45 | 64254,26 | 13,0 | 127018,95 | 125933,34 | 130104,49 | 76332,95 | 75939,54 | 77436,59 |
| | t2.07 | 0,27 | 4723,60 | 0,53 | 126649,54 | 6,5 | 183287,33 | 189218,75 | 161202,25 | 93601,62 | 95124,40 | 87481,04 |
| | t2.08 | 0,58 | 4381,31 | 0,50 | 100790,25 | 3,5 | 152792,76 | 155014,30 | 149445,78 | 84943,91 | 85626,12 | 83899,29 |
| | t2.09 | 0,33 | 5041,38 | 0,54 | 121738,12 | 7,0 | 180389,31 | 185022,53 | 164615,42 | 92839,93 | 94052,07 | 88476,58 |
| | t2.10 | 0,42 | 4898,90 | 0,55 | 132088,98 | 8,0 | 183806,38 | 189003,09 | 170304,03 | 93736,80 | 95069,87 | 90094,04 |
| | t2.11 | 0,62 | 4181,13 | 0,53 | 101529,26 | 9,0 | 157198,28 | 158291,94 | 160064,53 | 86288,32 | 86616,82 | 87144,89 |
| | t2.12 | 0,64 | 4175,00 | 0,64 | 117852,82 | 4,25 | 185126,91 | 184173,44 | 201781,04 | 94079,03 | 93832,17 | 98197,79 |
| | t2.13 | 0,43 | 5180,95 | 0,57 | 134036,14 | 13,0 | 187697,90 | 192478,72 | 176751,13 | 94738,50 | 95941,29 | 91866,73 |
| | t2.14 | 0,62 | 4444,00 | 0,57 | 106224,00 | 5,25 | 168145,27 | 168088,29 | 177509,61 | 89486,26 | 89470,12 | 92071,21 |
| | t2.15 | 0,71 | 4956,32 | 0,51 | 117370,20 | 10,25 | 157143,86 | 160854,52 | 153996,67 | 86271,92 | 87378,53 | 85314,71 |
| | t2.16 | 0,26 | 5128,89 | 0,62 | 154343,54 | 9,0 | 213800,96 | 220166,00 | 196092,42 | 100960,04 | 102357,41 | 96830,76 |
| | t2.17 | 0,24 | 4905,88 | 0,55 | 129575,48 | 10,25 | 190622,76 | 196034,29 | 171062,51 | 95477,93 | 96816,58 | 90305,87 |
| 14 | m | 0,47 | 4628,38 | 0,55 | 117378,83 | 8,21 | 174669,95 | 177759,20 | 168407,83 | 90937,79 | 91709,03 | 89283,08 |
| | d.e. | 0,16 | 426,61 | 0,05 | 24941,17 | 3,17 | 22658,69 | 24912,08 | 19389,57 | 6260,81 | 6783,87 | 5481,97 |
| | c.v. (%) | 33,7 | 9,2 | 9,3 | 21,2 | 38,6 | 13,0 | 14,0 | 11,5 | 6,9 | 7,4 | 6,1 |
| | t2.18 | 0,50 | 4100,88 | 0,60 | 111025,89 | 7,0 | 180659,89 | 180684,54 | 187749,12 | 138078,55 | 138092,95 | 142181,82 |
| | t2.19 | 0,38 | 4279,21 | 0,60 | 115980,58 | 4,0 | 187050,71 | 188343,84 | 186611,40 | 141780,92 | 142522,63 | 141528,37 |
| | t2.20 | 0,43 | 4299,03 | 0,60 | 120849,60 | 5,5 | 187825,60 | 189541,62 | 187749,12 | 142225,68 | 143207,44 | 142181,82 |
| | t2.21 | 0,45 | 4046,60 | 0,61 | 106523,67 | 8,5 | 183147,29 | 182164,12 | 192679,25 | 139526,88 | 138955,54 | 144991,34 |
| | t2.22 | 0,43 | 4364,36 | 0,56 | 140118,63 | 4,0 | 189117,22 | 195078,49 | 174096,44 | 142965,04 | 146345,75 | 134211,36 |
| | m | 0,44 | 4218,02 | 0,59 | 118899,67 | 5,80 | 185560,14 | 187162,52 | 185777,06 | 140915,41 | 141824,86 | 141018,94 |
| | d.e. | 0,04 | 136,77 | 0,02 | 13016,62 | 1,96 | 3529,92 | 5845,22 | 6938,14 | 2039,77 | 3353,99 | 4033,83 |
| | c.v. (%) | 9,7 | 3,2 | 3,1 | 10,9 | 33,7 | 1,9 | 3,1 | 3,7 | 1,4 | 2,4 | 2,9 |

| l/h | probeta | AAC | VL | D | Ed | θ | Et | Etot | Etd | MOEt | MOEtot | MOED |
|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 18 | t2.23 | 0,61 | 3895,24 | 0,57 | 95318,18 | 5,0 | 162866,47 | 161452,34 | 175613,41 | 139419,00 | 138381,44 | 148655,77 |
| | t2.24 | 0,25 | 4516,83 | 0,58 | 130515,53 | 6,0 | 195342,05 | 199959,93 | 179785,06 | 162552,73 | 165737,81 | 151634,12 |
| | t2.25 | 1,20 | 3818,64 | 0,41 | 62192,03 | 0,4 | 94054,42 | 91667,41 | 117968,77 | 85728,25 | 83740,68 | 105158,62 |
| | t2.26 | 0,94 | 3822,41 | 0,45 | 70845,26 | 3,0 | 115337,08 | 113877,51 | 130483,73 | 103062,37 | 101895,36 | 114989,91 |
| | t2.27 | 0,64 | 4087,04 | 0,54 | 97994,50 | 2,5 | 158261,85 | 158098,84 | 166511,62 | 136030,98 | 135910,53 | 142081,56 |
| | t2.28 | 0,64 | 4501,01 | 0,64 | 146489,10 | 3,0 | 197966,90 | 201064,29 | 202918,76 | 164366,26 | 166495,78 | 167765,39 |
| | m | 0,71 | 4106,86 | 0,53 | 100359,10 | 3,32 | 153971,46 | 154353,39 | 162213,56 | 131859,93 | 132026,93 | 138380,89 |
| | d.e. | 0,32 | 326,37 | 0,08 | 32851,00 | 1,97 | 42017,42 | 44483,97 | 32025,25 | 31719,64 | 33524,50 | 23703,26 |
| | c.v.(%) | 45,6 | 7,9 | 15,9 | 32,7 | 59,4 | 27,3 | 28,8 | 19,7 | 24,1 | 25,4 | 17,1 |
| | t2.29 | 0,22 | 4617,02 | 0,64 | 151262,15 | 1,5 | 217229,84 | 222595,40 | 202539,52 | 188868,82 | 192911,78 | 177665,05 |
| | t2.30 | 0,53 | 4005,66 | 0,48 | 79341,05 | 11,75 | 142994,14 | 142892,26 | 143757,16 | 130131,16 | 130046,78 | 130762,78 |
| | t2.31 | 0,55 | 4369,07 | 0,43 | 105732,15 | 1,8 | 143735,21 | 149396,72 | 124795,11 | 130744,62 | 135412,39 | 114884,49 |
| t2.32 | 0,96 | 4204,04 | 0,47 | 91210,15 | 1,5 | 127616,58 | 128125,93 | 139206,27 | 117271,33 | 117701,31 | 126986,62 | |
| t2.33 | 0,12 | 3541,67 | 0,66 | 93631,70 | 4,0 | 201494,60 | 197828,89 | 212020,54 | 176860,52 | 174030,04 | 184918,59 | |
| t2.34 | 0,44 | 4588,37 | 0,54 | 125902,58 | 2,25 | 178332,57 | 182949,36 | 166511,62 | 158761,37 | 162410,05 | 149323,99 | |
| t2.35 | 0,46 | 4536,17 | 0,55 | 116203,56 | 2,95 | 175874,40 | 178543,94 | 171062,51 | 156810,19 | 158928,87 | 152973,57 | |
| t2.36 | 0,37 | 4575,00 | 0,65 | 150354,28 | 2,3 | 213528,54 | 217615,49 | 208228,13 | 186064,66 | 189160,28 | 182027,15 | |
| t2.37 | 0,47 | 4685,71 | 0,65 | 155444,27 | 11,0 | 210968,03 | 215560,76 | 207090,41 | 184117,45 | 187605,85 | 181157,13 | |
| t2.38 | 0,42 | 4429,21 | 0,46 | 115468,04 | 4,75 | 158114,06 | 164667,93 | 134276,14 | 142535,23 | 147839,57 | 122871,25 | |
| m | 0,45 | 4355,19 | 0,55 | 118464,99 | 4,70 | 176988,80 | 180017,67 | 170948,74 | 157216,53 | 159604,69 | 152357,06 | |
| d.e. | 0,22 | 353,67 | 0,09 | 27057,95 | 3,93 | 32944,35 | 33436,64 | 34355,25 | 26229,16 | 26534,31 | 27494,78 | |
| c.v.(%) | 49,0 | 8,1 | 16,4 | 22,8 | 83,5 | 18,6 | 18,6 | 20,1 | 16,7 | 16,6 | 18,0 | |
| t2.39 | 0,45 | 3460,34 | 0,66 | 86690,08 | 5,5 | 183857,65 | 178117,73 | 210503,58 | 166117,33 | 161417,49 | 187569,25 | |
| t2.40 | 0,19 | 3684,96 | 0,64 | 96700,80 | 4,75 | 194664,03 | 192209,83 | 202160,28 | 174889,16 | 172905,72 | 180916,18 | |
| t2.41 | 0,51 | 3570,18 | 0,50 | 66130,06 | 2,5 | 141056,19 | 138445,80 | 149825,02 | 130374,28 | 128141,15 | 137830,20 | |
| t2.42 | 0,25 | 4490,53 | 0,53 | 117969,62 | 2,17 | 181270,15 | 185802,04 | 163098,45 | 164002,20 | 167702,97 | 148984,29 | |
| t2.43 | 0,47 | 4367,68 | 0,53 | 110502,51 | 2,95 | 167715,17 | 170532,48 | 161202,25 | 152827,12 | 155162,97 | 147400,47 | |
| t2.44 | 0,50 | 3817,54 | 0,50 | 79218,69 | 3,5 | 146706,82 | 146177,82 | 148687,30 | 135186,89 | 134737,58 | 136866,77 | |
| t2.45 | 0,42 | 3983,33 | 0,55 | 93490,88 | 4,5 | 167024,78 | 166691,24 | 169545,55 | 152253,66 | 151976,45 | 154345,49 | |
| m | 0,40 | 3910,65 | 0,56 | 92957,52 | 3,70 | 168899,26 | 168282,42 | 172146,06 | 153664,38 | 153149,19 | 156273,24 | |
| d.e. | 0,13 | 393,43 | 0,06 | 17773,94 | 1,25 | 19635,31 | 19843,65 | 24593,64 | 16324,70 | 16534,40 | 20162,02 | |
| c.v.(%) | 31,7 | 10,1 | 11,6 | 19,1 | 33,8 | 11,6 | 11,8 | 14,3 | 10,6 | 10,8 | 12,9 | |

Nota: θ: fibra revirada

TABLA 7A. Base de datos para la obtención de las diferencias entre MOE experimentales y MOE predictos para l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos Er, Etot y DE, para probetas cargadas en dirección radial. Diferencias con y sin valor absoluto.

| l/h | probeta | MOE | MOEr | dif%(1) | dif%(1) | MOEtot | dif%(2) | dif%(2) | MOED | dif%(3) | dif%(3) |
|-----|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 8 | r2,01 | 88790,23 | 92502,78 | 4,18 | -4,18 | 91997,82 | 3,61 | -3,61 | 91200,26 | 2,71 | -2,71 |
| | r2,02 | 98941,05 | 96300,92 | 2,67 | 2,67 | 94134,20 | 4,86 | 4,86 | 83328,57 | 15,78 | 15,78 |
| | r2,03 | 82863,13 | 80026,87 | 3,42 | 3,42 | 80120,93 | 3,31 | 3,31 | 83612,08 | 0,90 | -0,90 |
| | r2,04 | 70762,65 | 76343,20 | 7,89 | -7,89 | 75449,10 | 6,62 | -6,62 | 74311,20 | 5,01 | -5,01 |
| | r2,05 | 108450,36 | 95257,84 | 12,16 | 12,16 | 94960,37 | 12,44 | 12,44 | 96742,01 | 10,80 | 10,80 |
| | r2,06 | 98956,32 | 91539,41 | 7,50 | 7,50 | 90637,75 | 8,41 | 8,41 | 88876,02 | 10,19 | 10,19 |
| | r2,07 | 84072,25 | 90728,53 | 7,92 | -7,92 | 89931,63 | 6,97 | -6,97 | 88279,42 | 5,00 | -5,00 |
| | r2,08 | 66596,38 | 70736,94 | 6,22 | -6,22 | 69649,50 | 4,58 | -4,58 | 68734,67 | 3,21 | -3,21 |
| | r2,09 | 90395,48 | 95489,46 | 5,64 | -5,64 | 95087,63 | 5,19 | -5,19 | 95120,10 | 5,23 | -5,23 |
| | r2,10 | 96998,60 | 95424,91 | 1,62 | 1,62 | 95096,95 | 1,96 | 1,96 | 96651,10 | 0,36 | 0,36 |
| | r2,11 | 87099,36 | 88189,16 | 1,25 | -1,25 | 86875,99 | 0,26 | 0,26 | 81329,94 | 6,62 | 6,62 |
| | r2,12 | 91168,09 | 89067,94 | 2,30 | 2,30 | 88494,61 | 2,93 | 2,93 | 87731,94 | 3,77 | 3,77 |
| | r2,13 | 85857,19 | 89015,38 | 3,68 | -3,68 | 88281,24 | 2,82 | -2,82 | 87522,56 | 1,94 | -1,94 |
| | r2,14 | 94529,68 | 97917,81 | 3,58 | -3,58 | 97785,45 | 3,44 | -3,44 | 99424,24 | 5,18 | -5,18 |
| | r2,15 | 102655,09 | 92687,83 | 9,71 | 9,71 | 91460,73 | 10,90 | 10,90 | 89283,13 | 13,03 | 13,03 |
| | r2,16 | 86803,20 | 84509,18 | 2,64 | 2,64 | 82198,87 | 5,30 | 5,30 | 71326,18 | 17,83 | 17,83 |
| | r2,17 | 90070,74 | 89234,85 | 0,93 | 0,93 | 88368,11 | 1,89 | 1,89 | 86119,00 | 4,39 | 4,39 |
| 14 | m | 89706,46 | 89116,06 | 4,90 | | 88266,52 | 5,03 | | 86446,61 | 6,59 | |
| | d.e. | 10522,07 | 7439,74 | 3,22 | | 7548,15 | 3,22 | | 8768,34 | 5,15 | |
| | c.v.(%) | 11,73 | 8,35 | 65,63 | | 8,55 | 64,09 | | 10,14 | 78,15 | |
| | r2,18 | 133734,08 | 134174,14 | 0,33 | -0,33 | 134792,96 | 0,79 | -0,79 | 142294,58 | 6,40 | -6,40 |
| | r2,19 | 139978,65 | 129458,18 | 7,52 | 7,52 | 130284,15 | 6,93 | 6,93 | 137739,87 | 1,60 | 1,60 |
| | r2,20 | 171215,17 | 153654,96 | 10,26 | 10,26 | 154600,01 | 9,70 | 9,70 | 164374,82 | 4,00 | 4,00 |
| | r2,21 | 145169,53 | 130792,98 | 9,90 | 9,90 | 130348,10 | 10,21 | 10,21 | 134690,53 | 7,22 | 7,22 |
| | m | 147524,36 | 137020,06 | 7,00 | | 137506,30 | 6,91 | | 144774,95 | 4,80 | |
| | d.e. | 16471,28 | 11266,14 | 4,61 | | 11589,60 | 4,33 | | 13434,97 | 2,54 | |
| | c.v.(%) | 11,17 | 8,22 | 65,87 | | 8,43 | 62,62 | | 9,28 | 52,81 | |

| l/h | probeta | MOE | MOBr | dif%(1) | dif%(1) | MOEtot | dif%(2) | dif%(2) | MOED | dif%(3) | dif%(3) |
|-----|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 18 | r2,22 | 176118,08 | 168743,38 | 4,19 | 4,19 | 172724,03 | 1,93 | 1,93 | 202734,16 | 15,11 | -15,11 |
| | r2,23 | 177876,46 | 175226,35 | 1,49 | 1,49 | 172737,48 | 2,89 | 2,89 | 168894,30 | 5,05 | 5,05 |
| | r2,24 | 203176,57 | 177778,88 | 12,50 | 12,50 | 177065,98 | 12,85 | 12,85 | 182416,67 | 10,22 | 10,22 |
| | r2,25 | 145603,64 | 136790,55 | 6,05 | 6,05 | 138154,63 | 5,12 | 5,12 | 149087,12 | 2,39 | -2,39 |
| | r2,26 | 130950,80 | 117128,05 | 10,56 | 10,56 | 119662,15 | 8,62 | 8,62 | 140797,83 | 7,52 | -7,52 |
| | r2,27 | 154089,57 | 150330,65 | 2,44 | 2,44 | 151693,50 | 1,55 | 1,55 | 159658,11 | 3,61 | -3,61 |
| | r2,28 | 162360,80 | 167871,42 | 3,39 | -3,39 | 167986,76 | 3,47 | -3,47 | 177512,67 | 9,33 | -9,33 |
| | r2,29 | 93025,95 | 104546,27 | 12,38 | -12,38 | 103539,52 | 11,30 | -11,30 | 111881,91 | 20,27 | -20,27 |
| | m | 155400,23 | 149801,94 | 6,63 | | 150445,50 | 5,97 | | 161622,85 | 9,19 | |
| | d.e. | 33490,84 | 27773,65 | 4,53 | | 27542,23 | 4,39 | | 28022,26 | 6,05 | |
| 22 | c.v.(%) | 21,55 | 18,54 | 68,39 | | 18,31 | 73,65 | | 17,34 | 65,83 | |
| | r2,30 | 158508,37 | 165511,65 | 4,42 | -4,42 | 166007,26 | 4,73 | -4,73 | 176413,91 | 11,30 | -11,30 |
| | r2,31 | 185621,40 | 169278,21 | 8,80 | 8,80 | 172916,80 | 6,84 | 6,84 | 200571,82 | 8,05 | -8,05 |
| | r2,32 | 135792,07 | 118377,59 | 12,82 | 12,82 | 118477,22 | 12,75 | 12,75 | 129901,82 | 4,34 | 4,34 |
| | r2,33 | 185857,42 | 194555,83 | 4,68 | -4,68 | 193478,93 | 4,10 | -4,10 | 195733,45 | 5,31 | -5,31 |
| | r2,34 | 153891,38 | 160620,27 | 4,37 | -4,37 | 161763,67 | 5,12 | -5,12 | 169354,71 | 10,05 | -10,05 |
| | r2,35 | 177601,64 | 166365,73 | 6,33 | 6,33 | 165955,49 | 6,56 | 6,56 | 166667,16 | 6,16 | 6,16 |
| | r2,36 | 105114,34 | 127494,00 | 21,29 | -21,29 | 128059,63 | 21,83 | -21,83 | 134520,58 | 27,98 | -27,98 |
| | m | 157483,80 | 157457,61 | 8,96 | | 158094,14 | 8,85 | | 167594,78 | 10,45 | |
| | d.e. | 29519,94 | 26125,64 | 6,24 | | 26080,80 | 6,41 | | 27311,98 | 8,12 | |
| 24 | c.v.(%) | 18,74 | 16,59 | 69,69 | | 16,50 | 72,44 | | 16,30 | 77,70 | |
| | r2,37 | 145279,81 | 138462,94 | 4,69 | 4,69 | 139544,70 | 3,95 | 3,95 | 147818,34 | 1,75 | -1,75 |
| | r2,38 | 170339,01 | 138599,52 | 18,63 | 18,63 | 143558,59 | 15,72 | 15,72 | 181237,65 | 6,40 | -6,40 |
| | r2,39 | 75656,74 | 78360,44 | 3,57 | -3,57 | 82751,81 | 9,38 | -9,38 | 113875,30 | 50,52 | -50,52 |
| | r2,40 | 190417,68 | 168055,15 | 11,74 | 11,74 | 172024,03 | 9,66 | 9,66 | 197660,82 | 3,80 | -3,80 |
| | r2,41 | 141039,71 | 121652,54 | 13,75 | 13,75 | 127489,48 | 9,61 | 9,61 | 161169,02 | 14,27 | -14,27 |
| | r2,42 | 201939,93 | 172188,02 | 14,73 | 14,73 | 176625,06 | 12,54 | 12,54 | 208238,19 | 3,12 | -3,12 |
| | r2,43 | 79053,86 | 91895,28 | 16,24 | -16,24 | 94013,04 | 18,92 | -18,92 | 114721,57 | 45,12 | -45,12 |
| | m | 143389,53 | 129889,13 | 11,91 | | 133715,24 | 11,40 | | 160674,41 | 17,85 | |
| | d.e. | 50169,67 | 35502,50 | 5,73 | | 35711,78 | 4,87 | | 37683,99 | 20,93 | |
| 24 | c.v.(%) | 34,99 | 27,33 | 48,11 | | 26,71 | 42,75 | | 23,45 | 117,23 | |

TABLA 8A. Base de datos para la obtención de las diferencias entre MOE experimentales y MOE predictos para l/h de 8, 14, 18, 22 y 24, utilizando modelos Et, Etot y DE, para probetas cargadas en dirección tangencial. Diferencias con y sin valor absoluto.

| l/h | probeta | MOE | MOEt | diff(1) | diff(1) | MOEtot | diff(2) | diff(2) | MOED | diff(3) | diff(3) |
|-----|----------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 8 | t2.01 | 96977,04 | 87973,13 | 9,28 | 9,28 | 87276,10 | 10,00 | 10,00 | 92981,04 | 4,12 | 4,12 |
| | t2.02 | 95179,00 | 87538,97 | 8,03 | 8,03 | 88509,93 | 7,01 | 7,01 | 83539,51 | 12,23 | 12,23 |
| | t2.03 | 106934,00 | 101790,94 | 4,81 | 4,81 | 103181,47 | 3,51 | 3,51 | 98107,89 | 8,25 | 8,25 |
| | t2.04 | 94117,65 | 86172,61 | 8,44 | 8,44 | 86036,70 | 8,59 | 8,59 | 86919,59 | 7,65 | 7,65 |
| | t2.05 | 86195,29 | 93709,60 | 8,72 | -8,72 | 95824,47 | 11,17 | -11,17 | 87144,89 | 1,10 | -1,10 |
| | t2.06 | 81605,72 | 76332,95 | 6,46 | 6,46 | 75939,54 | 6,94 | 6,94 | 77436,59 | 5,11 | 5,11 |
| | t2.07 | 92574,10 | 93601,62 | 1,11 | -1,11 | 95124,40 | 2,75 | -2,75 | 87481,04 | 5,50 | 5,50 |
| | t2.08 | 74032,22 | 84943,91 | 14,74 | -14,74 | 85626,12 | 15,66 | -15,66 | 83899,29 | 13,33 | -13,33 |
| | t2.09 | 86137,28 | 92839,93 | 7,78 | -7,78 | 94052,07 | 9,19 | -9,19 | 88476,58 | 2,72 | -2,72 |
| | t2.10 | 96487,26 | 93736,80 | 2,85 | 2,85 | 95069,87 | 1,47 | 1,47 | 90094,04 | 6,63 | 6,63 |
| | t2.11 | 104101,29 | 86288,32 | 17,11 | 17,11 | 86616,82 | 16,80 | 16,80 | 87144,89 | 16,29 | 16,29 |
| | t2.12 | 103241,40 | 94079,03 | 8,87 | 8,87 | 93832,17 | 9,11 | 9,11 | 98197,79 | 4,89 | 4,89 |
| | t2.13 | 98109,09 | 94738,50 | 3,44 | 3,44 | 95941,29 | 2,21 | 2,21 | 91866,73 | 6,36 | 6,36 |
| | t2.14 | 101010,08 | 89486,26 | 11,41 | 11,41 | 89470,12 | 11,42 | 11,42 | 92071,21 | 8,85 | 8,85 |
| | t2.15 | 98461,54 | 86271,92 | 12,38 | 12,38 | 87378,53 | 11,26 | 11,26 | 85314,71 | 13,35 | 13,35 |
| | t2.16 | 97546,75 | 100960,04 | 3,50 | -3,50 | 102357,41 | 4,93 | -4,93 | 96830,76 | 0,73 | 0,73 |
| | t2.17 | 97727,62 | 95477,93 | 2,30 | 2,30 | 96816,58 | 0,93 | 0,93 | 90305,87 | 7,59 | 7,59 |
| 14 | m | 94731,61 | 90937,79 | 7,72 | 7,72 | 91709,03 | 7,82 | 7,82 | 89283,08 | 7,34 | 7,34 |
| | d.e. | 8483,76 | 6260,81 | 4,48 | 4,48 | 6783,87 | 4,74 | 4,74 | 5481,97 | 4,40 | 4,40 |
| | c.v. (%) | 8,96 | 6,88 | 58,04 | 58,04 | 7,40 | 60,67 | 60,67 | 6,14 | 59,95 | 59,95 |
| | t2.18 | 129191,15 | 138078,55 | 6,88 | -6,88 | 138092,95 | 6,89 | -6,89 | 142181,82 | 10,06 | -10,06 |
| | t2.19 | 159146,62 | 141780,92 | 10,91 | 10,91 | 142522,63 | 10,45 | 10,45 | 141528,37 | 11,07 | 11,07 |
| | t2.20 | 153210,50 | 142225,68 | 7,17 | 7,17 | 143207,44 | 6,53 | 6,53 | 142181,82 | 7,20 | 7,20 |
| | t2.21 | 134811,15 | 139526,88 | 3,50 | -3,50 | 138955,54 | 3,07 | -3,07 | 144991,34 | 7,55 | -7,55 |
| | t2.22 | 156013,77 | 142965,04 | 8,36 | 8,36 | 146345,75 | 6,20 | 6,20 | 134211,36 | 13,97 | 13,97 |
| | m | 146474,64 | 140915,41 | 7,36 | 3,21 | 141824,86 | 6,63 | 2,64 | 141018,94 | 9,97 | 2,93 |
| | d.e. | 13524,99 | 2039,77 | 2,68 | 7,88 | 3353,99 | 2,62 | 7,28 | 4033,83 | 2,77 | 11,01 |
| | c.v. (%) | 9,23 | 1,45 | 36,44 | 245,19 | 2,36 | 39,54 | 275,74 | 2,86 | 27,83 | 376,14 |

| l/h | probeta | MOE | MOEt | dif%(1) | dif%(1) | MOEtot | dif%(2) | dif%(2) | MOED | dif%(3) | dif%(3) | |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|--------|
| 18 | t2.23 | 145198,44 | 139419,00 | 3,98 | 3,98 | 138381,44 | 4,69 | 4,69 | 148655,77 | 2,38 | -2,38 | |
| | t2.24 | 170037,85 | 162552,73 | 4,40 | 4,40 | 165737,81 | 2,53 | 2,53 | 151634,12 | 10,82 | 10,82 | |
| | t2.25 | 78886,01 | 85728,25 | 8,67 | -8,67 | 83740,68 | 6,15 | -6,15 | 105158,62 | 33,30 | -33,30 | |
| | t2.26 | 104067,44 | 103062,37 | 0,97 | 0,97 | 101895,36 | 2,09 | 2,09 | 114989,91 | 10,50 | -10,50 | |
| | t2.27 | 149803,70 | 136030,98 | 9,19 | 9,19 | 135910,53 | 9,27 | 9,27 | 142081,56 | 5,15 | 5,15 | |
| | t2.28 | 188927,66 | 164366,26 | 13,00 | 13,00 | 166495,78 | 11,87 | 11,87 | 167765,39 | 11,20 | 11,20 | |
| | m | 139486,85 | 131859,93 | 6,70 | | 132026,93 | 6,10 | | 138380,89 | 12,23 | | |
| | d.e. | 41094,56 | 31719,64 | 4,37 | | 33524,50 | 3,85 | | 23703,26 | 10,93 | | |
| | c.v.(%) | 29,46 | 24,06 | 65,16 | | 25,39 | 63,15 | | 17,13 | 89,39 | | |
| | 22 | t2.29 | 198663,56 | 188868,82 | 4,93 | 4,93 | 192911,78 | 2,90 | 2,90 | 177665,05 | 10,57 | 10,57 |
| | | t2.30 | 118416,37 | 130131,16 | 9,89 | -9,89 | 130046,78 | 9,82 | -9,82 | 130762,78 | 10,43 | -10,43 |
| | | t2.31 | 117390,65 | 130744,62 | 11,38 | -11,38 | 135412,39 | 15,35 | -15,35 | 114884,49 | 2,13 | 2,13 |
| t2.32 | | 100115,47 | 117271,33 | 17,14 | -17,14 | 117701,31 | 17,57 | -17,57 | 126986,62 | 26,84 | -26,84 | |
| t2.33 | | 192660,41 | 176860,52 | 8,20 | 8,20 | 174030,04 | 9,67 | 9,67 | 184918,59 | 4,02 | 4,02 | |
| t2.34 | | 178310,43 | 158761,37 | 10,96 | 10,96 | 162410,05 | 8,92 | 8,92 | 149323,99 | 16,26 | 16,26 | |
| t2.35 | | 164029,38 | 156810,19 | 4,40 | 4,40 | 158928,87 | 3,11 | 3,11 | 152973,57 | 6,74 | 6,74 | |
| t2.36 | | 187248,53 | 186064,66 | 0,63 | 0,63 | 189160,28 | 1,02 | -1,02 | 182027,15 | 2,79 | 2,79 | |
| t2.37 | | 185019,15 | 184117,45 | 0,49 | 0,49 | 187605,85 | 1,40 | -1,40 | 181157,13 | 2,09 | 2,09 | |
| t2.38 | | 141448,24 | 142535,23 | 0,77 | -0,77 | 147839,57 | 4,52 | -4,52 | 122871,25 | 13,13 | 13,13 | |
| m | | 158330,22 | 157216,53 | 6,88 | | 159604,69 | 7,43 | | 152357,06 | 9,50 | | |
| d.e. | | 36099,74 | 26229,16 | 5,58 | | 26534,31 | 5,81 | | 27494,78 | 7,84 | | |
| c.v.(%) | 22,80 | 16,68 | 81,10 | | 16,63 | 78,20 | | 18,05 | 82,55 | | | |
| 24 | t2.39 | 160296,85 | 166117,33 | 3,63 | -3,63 | 161417,49 | 0,70 | -0,70 | 187569,25 | 17,01 | -17,01 | |
| | t2.40 | 199965,99 | 174889,16 | 12,54 | 12,54 | 172905,72 | 13,53 | 13,53 | 180916,18 | 9,53 | 9,53 | |
| | t2.41 | 118977,13 | 130374,28 | 9,58 | -9,58 | 128141,15 | 7,70 | -7,70 | 137830,20 | 15,85 | -15,85 | |
| | t2.42 | 158605,91 | 164002,20 | 3,40 | -3,40 | 167702,97 | 5,74 | -5,74 | 148984,29 | 6,07 | 6,07 | |
| | t2.43 | 145715,49 | 152827,12 | 4,88 | -4,88 | 155162,97 | 6,48 | -6,48 | 147400,47 | 1,16 | -1,16 | |
| | t2.44 | 146679,07 | 135186,89 | 7,83 | 7,83 | 134737,58 | 8,14 | 8,14 | 136866,77 | 6,69 | 6,69 | |
| | t2.45 | 137485,09 | 152253,66 | 10,74 | -10,74 | 151976,45 | 10,54 | -10,54 | 154345,49 | 12,26 | -12,26 | |
| | m | 152532,22 | 153664,38 | 7,52 | | 153149,19 | 7,55 | | 156273,24 | 9,79 | | |
| | d.e. | 25100,56 | 16324,70 | 3,63 | | 16534,40 | 4,01 | | 20162,02 | 5,67 | | |
| | c.v.(%) | 16,46 | 10,62 | 48,27 | | 10,80 | 53,12 | | 12,90 | 57,91 | | |

Verificación de modelos a través del módulo de elasticidad aparente.

Para la verificación de los modelos se utilizó el módulo de elasticidad aparente, para lo cual se tomaron 90 viguetas del stock inicial (las que no habían sido ocupadas), estas fueron divididas en dos grupos de 45, los que fueron ensayados, uno en dirección radial y el otro en dirección tangencial.

A su vez cada grupo se dividió en cinco relaciones l/h (8, 14, 18, 22, 24), para ello las viguetas fueron rebajadas a 5 luces 16, 28, 36, 44, 48. De un extremo de ellas se corto un cubo de madera de 2cm de lado para aplicar los ensayos con ultrasonido.

Así las viguetas fueron cargadas en dirección radial o tangencial (según correspondiera) y constante en la parte media de la luz, hasta la ruptura. Las lecturas de las cargas para $l/h = 8$, fueron efectuadas cada 5 kgf y para los l/h restantes cada 10 kgf.

Con estos valores se determinaron los módulos de elasticidad aparente para cada vigueta utilizando la ecuación 6.

X ANEXOS

ANEXO 1 Principio del método de medición de velocidad de propagación de pulsos de ultrasonido.

Este método consiste básicamente, en que un generador emite pulsos periódicos, la señal eléctrica es convertida en una onda elástica por la cerámica piezoeléctrica del transductor emisor, las ondas de compresión (vibraciones) son transmitidas a través de la probeta. La señal retardada es recuperada por el transductor receptor y la medida del retardo, dada por la diferencia de tiempo entre la señal emitida y la recuperada, determina el tiempo de propagación de pulso a través del material ensayado (Bucur 1984; Mc Donald 1993, citado por Bravo, 1996) (figura 1B).

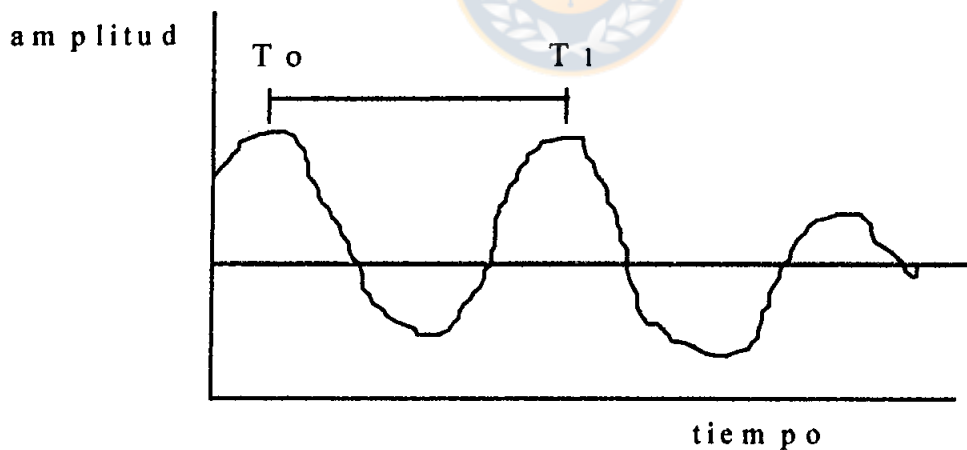


FIGURA 1B. Tiempo de retardo de onda a su paso por la madera. T_0 señal emitida, T_1 señal recuperada.

ANEXO 2 Principio para la determinación del Módulo de Elasticidad.

Según Timoshenko (citado por Biblis 1965), la deflexión total que sufre una viga, está compuesta por dos contribuciones: una debida a la flexión pura (Y_p), y la otra causada por el cizalle horizontal (Y_z);

$$Y_t = Y_p + Y_z \text{ (cm)} \quad \text{ec.11}$$

donde, la deflexión debida al cizalle queda definida por la expresión:

$$Y_z = \frac{3 * P l}{10 * b * h * G} \quad \text{ec.12}$$

donde:

G = Módulo de cizalle horizontal.

$b * h$ = sección transversal del área.

Y corresponde al desplazamiento en forma dispar de planos contiguos, producto de las condiciones de carga y de las propiedades de la viga.

Y la deflexión pura se define por la ecuación:

$$Y_p = \frac{P * l^3}{48 * E * I} \quad \text{ec.13}$$

$$Y_p = \frac{P * l^3}{48 * E * I} + \frac{3 * P * l}{10 * b * h * G} \quad \text{ec.14}$$

Con esta expresión determinamos el módulo de elasticidad real de la madera, que es una medida de la rigidez del material (Pérez).

Nótese que si ignoramos Y_z , el módulo de elasticidad involucrado, no es el real sino sólo un valor aparente (MOE). La magnitud del error inducido al ignorar la deflexión debido al cizalle horizontal depende de; el tipo de viga, las condiciones de carga y de la razón E/G , y la relación existente entre la luz de la viga (distancia entre los apoyos) y su espesor, que se conoce por la relación l/h .

Para usar la ecuación 8 se asume según norma ASTM, la relación E_R/G constante y de 16, así la ecuación queda:

$$Y_t = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} + \frac{3 \cdot P \cdot L}{10 \cdot b \cdot h \cdot E / 16} \quad \text{ec.15}$$

Para vigas de sección de área rectangular, con $I = bh^3/12$, esta expresión queda de la forma:

$$E = \frac{P \cdot (l/h)}{4 \cdot Y_t \cdot b} + ((l/h) + C) \quad \text{ec.16}$$

En que C es una constante numérica, que depende de las condiciones de carga, donde $C = 19,2 (E_R/G)$

Ahora bien, si $c=0$, se obtiene el valor del MOE:

$$\text{MOE} = \frac{P \cdot (l/h)}{4 \cdot Y_t \cdot b} \cdot (l/h)^2 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{ec.17}$$

Finalmente de estas ecuaciones se puede determinar la razón que existe entre MOE y E quedando de la forma siguiente

$$\frac{\text{MOE}}{E} = \frac{(1/h)^2}{(1/h)^2 + C} \quad \text{ec.18}$$

de donde despejando obtenemos:

$$\text{MOE} = \frac{E \cdot (1/h)^2}{(1/h)^2 + C} \quad \text{ec.19}$$



ANEXO 3 Metodología para la obtención de E_R y G

Para este propósito se empleó la relación propuesta por Timoshenko:

$$MOE = \frac{E}{1 + 0,3 * 0,5 (1/h)^2 * (E/G)} \quad \text{ec.20}$$

la cual puede ser transformada a la forma rectilínea:

$$\frac{0,5 * (1/h)^2}{MOE} = \frac{0,3}{G} + \frac{1}{E} * \frac{0,5 * 1}{h} \quad \text{ec.7}$$

\Downarrow
a

\Downarrow
b

Donde:

- MOE = Módulo de Elasticidad experimental para cada relación l/h .
- l/h = relación luz espesor.
- E = módulo de elasticidad real.
- G = módulo de rigidez.
- a = intercepto.
- b = pendiente.

Así ajustamos los valores de MOE a distintos L/h de cada una de las 52 probetas a la ecuación 11 y obtenemos a través del intercepto los valores de G y de la pendiente los valores de E , para cada probeta, siendo;

$$E = \frac{1}{b} \quad \text{y} \quad G = \frac{0,3}{a}$$