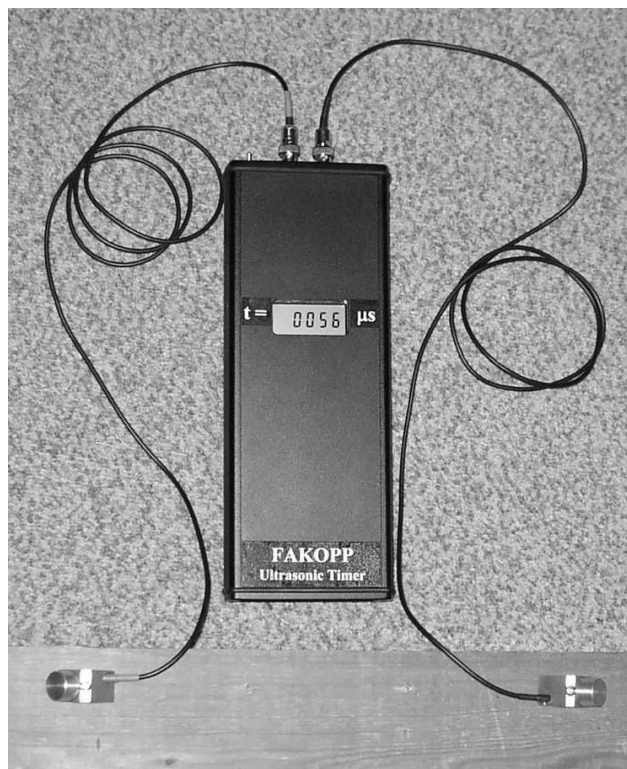




SUBPROYECTO:
“OPCIONES PARA LA PROMOCIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE MADERAS PROCEDENTES DE PLANTACIONES FORESTALES CON ESPECIES NATIVAS DE LA REGIÓN AMAZÓNICA”



Estudio

Desarrollo de Técnicas No Destructivas (medición en Ultrasonido) para la determinación de propiedades mecánicas de maderas.

Autor: Alois Orlando López Sandoval

Supervisión: Lic. Luis Yoza Yoza UNALM.
Ing. Moises Pascual Acevedo UNALM.

Agosto 2010

1.- INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como finalidad la aplicación de las técnicas no destructivas acústicas en la determinación de las propiedades mecánicas de la especie “tornillo” del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt. Lo que permitió determinar los coeficientes C_{11} , C_{22} y C_{33} del tensor de rigidez de las muestras estudiadas.

2.- OBJETIVOS GENERAL:

- Desarrollo de técnicas de medición en Ultrasonido Aplicadas a maderas.
- Determinación de las características mecánicas, usando las técnicas de ultrasonido en 3 especies de maderas.

Objetivos Especificos

- Determinación de las propiedades mecánicas en las especies Tornillo (*Cedrelinga cateniformis Ducke*) de plantación.
- Estudiar el comportamiento de la propagación de las ondas acústicas longitudinales tanto en la dirección radial como tangencial en rodajas de la especie Tornillo, usando ondas de ultrasonido de 23 y 45 kHz.

3.- METAS:

- Medición y comparación de las velocidades de propagación de las ondas longitudinales en las direcciones radiales y tangenciales.
- Evaluación de la variación angular de la velocidad de propagación desde la dirección radial a la tangencial de las ondas acústicas.

4.- REVISION BIBLIOGRÁFICA

4.1.- ASPECTOS SOBRESALIENTES DEL ÁRBOL

Nombre.- Tornillo (*Cedrelinga cateniformis Ducke*)

Distribución Geográfica.- Sudamérica tropical

Descripción del Árbol:

Según Reynel (2003), el “Tornillo” cuenta con las siguientes características morfológicas:

Árbol de 0,5-2 m de diámetro y 20-40 m de altura total, con fuste cilíndrico, la ramificación del segundo o tercer tercio, la base del fuste recta.

Corteza externa de agrietada a fisurada, color marrón pardo a rojizo, con placas de ritidoma de unos 3-5 x 8-13cm. Corteza interna homogénea, color crema a rosado blanquecino, sin secreciones., referenciado por Sucksmith (2009).

Características Anatómicas

Descripción de la Madera: En condición seca al aire, la albura es de color rosado y el duramen rosado oscuro. Anillos de crecimiento poco diferenciados limitados por bandas oscuras en forma irregular. Grano recto a ligeramente entrecruzados, textura gruesa y brillo medio. Veteado ausente. Madera con peso específico básico de 0,45. Acevedo (1994).

Vasos.- El diámetro tangencial varía de 293 a 333 μm y la longitud entre 412 a 431 μm . Platina de perforación horizontal con perforación simple. Punteado intervascular alterno con punteadura redondas y abertura incluida. Punteado radiovascular similar al intervascular. Presencia de inclusiones gomosas. Acevedo (1994).

Parenquima.-

Paratraqueal vasicéntrico, no estratificado. Presencia de inclusiones gomosas. Acevedo (1994).

Radios.-

Homogeneos uniseriados. No estratificadas. Altura entre 240 y 345 μm . Presencia abundantes de gomas. Acevedo (1994).

Fibras

Libriformes, no estratificadas. El diámetro total es de 24 μm . El grosor de la pared celular de 3 μm . Y la longitud varía entre 1443 y 1454 μm . Acevedo. (1994).

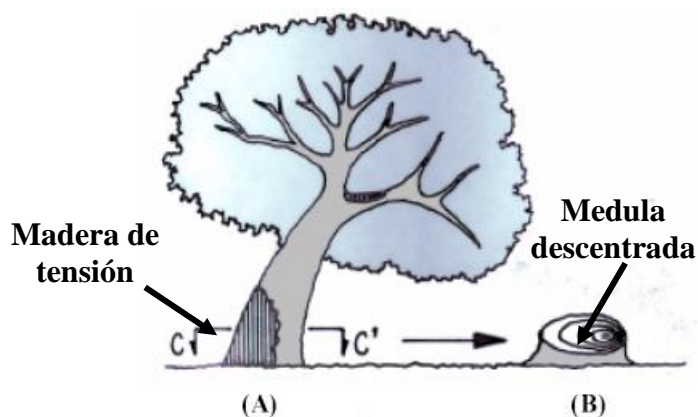
Madera de Reacción (Tensión)

Es sabido, que el crecimiento de los árboles del tipo latifoliadas tropicales en las laderas forman en su duramen zonas de tensión (lado más ancho) como una reacción para compensar la acción del peso del árbol al inclinarse en las mismas evitando su caída y provocando además el desplazamiento de su medula, descentrándola, Fig 1. En esta zona se encuentran frecuentemente propiedades mecánicas (MOEs) inferiores en comparación con las zonas no tensionadas y con velocidades de propagación de las ondas acústicas menores, Li (2007).

La madera en tensión también se puede formar en respuesta a la acción del viento u otra fuerza. Otro caso es el de doblamiento del árbol por acción fototrópica, que al buscar la mayor cantidad de energía solar se doblan generando estas fuerzas de reacción. Maeglin (1987)

Fig. 1

Formación de madera de tensión en árboles del tipo latifoliadas



Fuente: Chan M. (2002); donde: C-C' corte del árbol

4.2 CARACTERISTICAS TECNOLGICAS

Cuadro 1
Propiedades de la madera:

Propiedades Físicas	
Densidad básica	0,45g/cm ³
Contracción tangencial	3,0 %
Contracción radial	1,00 %
Contracción Volumétrica	3,90 %
Relación tangencial/radial	2,2
Sílice	

Fuente: INIA. Maderas del Perú/ Congreso de la Republica

Propiedades Mecánicas

Módulo de elasticidad en flexión	99 000 kg/cm ²
Módulo de rotura en flexión	693,00 kg/cm ²
Compresión paralela (RM)	413,00 kg/cm ²
Compresión perpendicular (ELP)	66,00 kg/cm ²

Corte Paralelo a la fibra	87 kg/cm ²
Dureza en los lados	373,0 kg/cm ²
Tenacidad (resistencia al choque)	2,88 kg/-m

RM= Resistencia máxima

ELP= Esfuerzo limite proporcional

Fuente: INIA. Maderas del Perú/ Congreso de la Republica

Usos.- El tornillo es una madera de fácil trabajabilidad y acabado apropiado para la producción de piezas de estructuras para construcción de viviendas, puertas y ventanas, Actualmente es usado en pisos de las casas, armaduras, vigas columnas, carpintería de interiores, artesanía y fabricación de carrocerías. INIA (1999).

Estudio preliminares.-

Sucksmith en el 2007, realizo en la Plantación Experimental del Von Humboldt, estudios de 14 árboles de Tornillo efectuando evaluaciones no destructivas de trozas de la parte central de los árboles en listones longitudinales, obteniendo buenos resultados al compararlos con los obtenidos con el método de flexión estática. Encontrando además buena correlación entre la propagación de las ondas de 45 y 23kHz (Microsecong y Ultrasonic Timer) con coeficientes de determinación entre 0,64 y 0,66 para los MOE de Compresión Paralela y entre 0,77 y 0,80 para MOE de Flexión Estática.

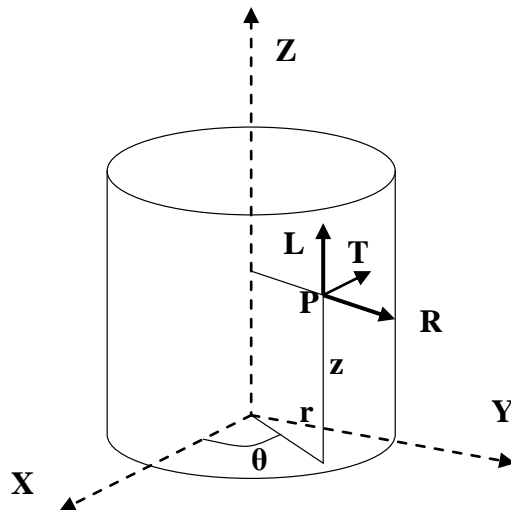
Wang et al (2001) explica que la propagación de ondas es un proceso dinámico relacionado con las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Diferentes tipos de ondas pueden propagarse en la estructura de la madera, tales como las ondas longitudinales y ondas transversales. Las ondas longitudinales son las más veloces de todas las ondas y son usadas comúnmente para la evaluación de las propiedades de la madera, referenciado por Sucksmith (2007).

4.3 Estudios de Evaluación no Destructiva

Propagación de ondas en medios ortotópicos.

Bases teóricas.- Sea el punto P un punto en una muestra ideal de madera en coordenadas cilíndricas (z,θ, r) que es equivalente a las coordenadas naturales (L,T,R) , donde L es la dirección longitudinal., T la dirección tangencial y R es la dirección radial Fig. 2.

Fig. 2. Sistema de coordenadas



Comportamiento mecánico.- La madera, se comporta como un sólido que obedece la ley de Hooke Generalizada ecuación 1, con simetría ortotrópica y 9 componentes independientes del tensor de rigidez. Bucur (1984)

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad 1$$

Donde i,j,k,l toman valores de (1,2,3).

$\sigma_{i,j}$ = Componentes del tensor de esfuerzos,

$\epsilon_{k,l}$ = Componentes del tensor de deformación,

$c_{i,j,k,l}$ = Componentes del tensor de rigidez.

O de la forma inversa:

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad 2$$

Donde: S_{ijkl} = Tensor de coeficientes elásticos.

Para el caso de la madera, se tiene la ecuación:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & \text{simetrica} & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad 3$$

Donde: $C_{1111} = C_{11} = C_{LL}$; $C_{1122} = C_{12} = C_{LT}$; $C_{1133} = C_{13} = C_{LR}$; $C_{2222} = C_{22} = C_{TT}$;
 $C_{2233} = C_{23} = C_{TR}$; $C_{3333} = C_{33} = C_{RR}$; $C_{2323} = C_{44} = C_{TR}$; $C_{3131} = C_{55} = C_{RL}$, $C_{1212} = C_{66} = C_{LT}$.

La cual en términos de los coeficientes elásticos nos da la ecuación inversa siguiente:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & \text{simetrica} & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad 4$$

Ecuación que permite determinar los parámetros de ingeniería del material en estudio, y que se muestra en la ecuación 5

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & \text{simetrica} & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad 5$$

Donde: E_1, E_2 y E_3 son los módulos de Young y G_{12}, G_{13} y G_{23} los módulos de corte y de acuerdo con las matrices 4 y 5 tenemos que: $E_1=1/S_{11}$; $E_2=1/S_{22}$; $E_3=1/S_{33}$; $G_{12}=1/S_{66}$, $G_{23}=1/S_{44}$, $G_{13}=1/S_{55}$.; además obtenemos los valores de los coeficientes de Poisson $\nu_{ij} = -\epsilon_i / \epsilon_j$.

Propagación de ondas elásticas en las direcciones principales

La propagación de una onda elástica en un medio infinito está dada por la ecuación:

$$C_{ijkl} u_{k,lj} = \rho u_{i,tt} \quad 6$$

Donde: u = desplazamiento de la onda; ρ es la densidad de la cuerpo y lj son las direcciones de las derivadas del vector desplazamiento y tt es la doble derivada en tiempo.

Aplicando a la ecuación anterior una onda plana u_k , con el coseno director p_i en la dirección de propagación.

$$u_k = A_k \exp \left[j\omega \left(t - \frac{p_i x_i}{v} \right) \right] \quad 7$$

Donde u_k no es necesariamente colineal al vector de propagación $\mathbf{p}(p_1, p_2, p_3)$ y se puede escribir $A_k = A \mathbf{d}_k$, siendo \mathbf{d}_k un vector unitario en la dirección del movimiento de las partículas.

Aplicando la ecuación 7 en 6 tenemos:

$$C_{ijkl} p_l p_j A_k - \rho v^2 A_i = 0 \quad 8$$

Haciendo: $\Gamma_{ik} = C_{ijkl} p_l p_j$ tensor de Christoffel.

$$\Gamma_{ik} - \rho v^2 \delta_{ik} \quad 9$$

Relación denominada Ecuación de Christoffel

Donde: δ_{ik} es el delta de Kronecker para hacer $A_i = A_k \delta_{ik}$

La ecuación muestra la velocidad fase V y la dirección de polarización k (dirección de vibración de las partículas).

De otro lado, para una onda plana que se propaga en la dirección \mathbf{p} de un material de rigidez C_{ijkl} se puede obtener los valores propios del tensor de Christoffel,

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{bmatrix} = 0 \quad 10$$

Con las siguientes propiedades:

- Los valores propios del tensor Γ_{ik} son reales,
- Los valores propios son positivos debido a que: $\rho v^2 > 0$,
- Los vectores propios son ortogonales.

La ecuación 10 nos permite calcular todos los valores de C_{ijkl} experimentalmente permitiendo completar la matriz del tensor de rigidez, ecuación 3, a la cual se toma la inversa para determinar la matriz del tensor de coeficientes elásticos S_{ijkl} y con esto los parámetros de ingeniería buscados.

En el caso de la rodaja estamos con onda generada en el plano RT.

Caso 1: propagación en la dirección 2 (tangencial)

$p_2=1$, $p_1=0$ y $p_3=0$ quedando la ecuación de Christoffel reducido a:

$$\begin{bmatrix} c_{66} - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} - \rho v^2 & \\ & & c_{44} - \rho c^2 \end{bmatrix} = 0 \quad 11$$

Cuya solución nos permite determinar:

$$\begin{aligned} c_{66} &= \rho v^2 && \text{Onda transversal polarización en el eje L} \\ c_{22} &= \rho v^2 && \text{Onda longitudinal polarización en el eje T} \\ c_{44} &= \rho v^2 && \text{Onda transversal polarización en el eje R} \end{aligned} \quad 12$$

Caso 2: propagación en la dirección 3 (radial)

$p_3=1$, $p_1=0$ y $p_2=0$ quedando la ecuación de Christoffel reducido a:

$$\begin{bmatrix} c_{55} - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_{44} - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} - \rho c^2 \end{bmatrix} = 0 \quad 13$$

$$\begin{aligned} c_{55} &= \rho v^2 && \text{Onda transversal polarización en el eje L} \\ c_{44} &= \rho v^2 && \text{Onda transversal polarización en el eje T} \\ c_{33} &= \rho v^2 && \text{Onda longitudinal polarización en el eje R} \end{aligned} \quad 14$$

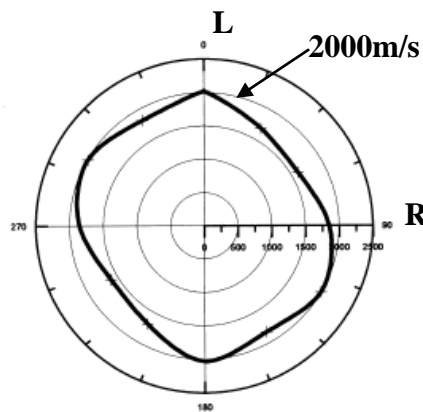
De las soluciones de las ecuaciones 12 y 14 separando las soluciones para las ondas de polarización longitudinal que son las más rápidas e intensas, y que pueden ser medidas por nuestros equipos, obtenemos los valores de C_{22} y C_{33} respectivamente. Bucur(1995).

Pico (2004) haciendo estudios en maderas de Ebano y Nogal encontró los siguientes valores para los coeficientes C_{11} , C_{22} y C_{33} : 24,0; 4,8 y 5,6 GP para el Ebano y 10,0; 1,2 y 2,4 GP para el Nogal. a la frecuencia de 1mHz.

Encontrando además la distribución angular de las velocidades en el plano (LR) como se muestra en la figura 3.

Fig. 3

Distribución angular en el plano LR de las velocidades de propagación de una onda de 1mHz



Bucur V.(1987), estudiando las maderas de Haya y Abeto encontró valores para los mismos parámetros con 173,25; 16,4 y 32,63 GP para la Haya y 13,9; 6,38 y 12,19 GP para el Abeto. (GP= giga Pascal).

Li et al (2007) al estudiar la asimetría entre las velocidades radiales y tangenciales define el factor de asimetría:

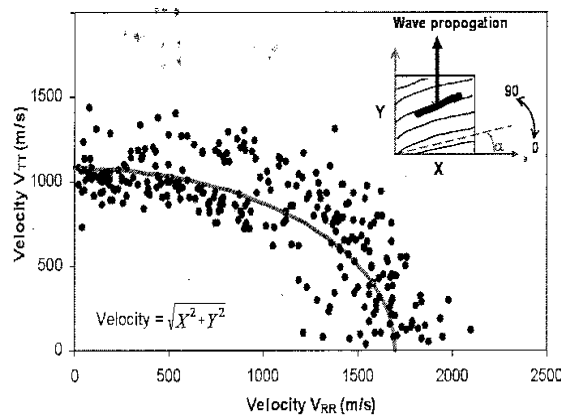
$$\text{Factor.asimetria} = \frac{(V_{RR} - V_{TT})}{V_{RR}}$$

15

Factor que para las especies *E abliqua* y *Prunas avium* es del orden de 0,37 valor que es usado para efectuar correcciones en tomografía acústica. Además, el autor estudio en el eucalipto *E. oblicua* la distribución angular de las velocidades en el plano TR como se muestra en la fig 4. con buenos resultados en el uso de los métodos no destructivos.

Fig. 4

Distribución angular de las velocidades en el plano TR de la especie *E. obliqua* al 12% de humedad



Propagación de ondas elásticas en el plano 23 (TR)

La propagación en el plano 23 (RT) puede ser:

Transversal pura con polarización en el eje 1 (L),

Quasilongitudinal (QL) con polarización ortogonal entre ellas,

Quasitransversal (QT) con polarización ortogonal ente ellas.

5.- MATERIALES Y MÉTODOS.

5.1.- Madera

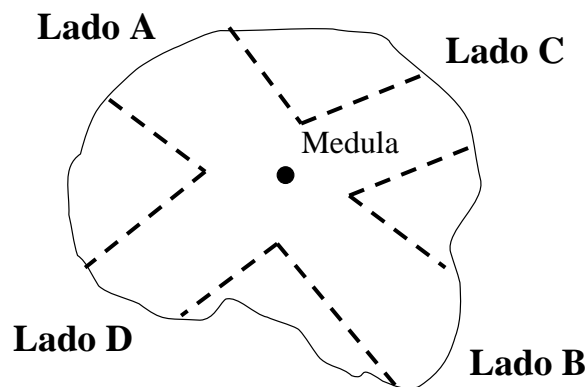
Las muestras de madera para el estudio se extrajeron del Área Piloto de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt, la que esta ubicada en el Km. 86 de la carretera Federico Basadre, Caserío Von Humboldt en el Distrito de Irazola, Provincia del Padre Abad de la Región Ucayali. Se enmarca entre las coordenadas geográficas de 8° 22' a 9° 36' latitud Sur y de 74° 48' a 75° 35' de longitud oeste, y una altitud de 200 a 340 msnm. Cuyas edades fluctúan entre 20 a 23 años, altura promedio entre 18,9 a 25,6 m y con un DAP promedio entre 32 a 38,9 cm. INIA (1983)

5.2 Muestras.-Se obtuvieron 4 rodajas a la altura de la base de 4 árboles las cuales identificadas en el Laboratorio de Anatomía de la Madera en la Facultad de Ciencias Forestales, secadas al ambiente. Las rodajas fueron secadas en un ambiente seco hasta que alcanzaron la humedad de equilibrio.

Se prepararon muestras en bandas radiales de entre 10 a 15 cm de ancho centradas en la medula evitando las zonas con rajaduras internas, como se muestra en la Fig. 5

Fig. 5

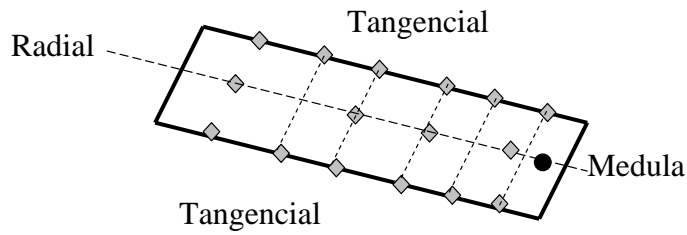
Formas de las muestras.



Se establecieron dos modos de medición en el primero, iniciando de la medula radicalmente se establecieron puntos localizados entre 7-10 cm de distancia entre ellos hasta llegar al borde de la albura; en la parte tangencial se localizaron en los bordes del corte puntos equidistantes entre 5-8 cm entre ellos, Fig 6.

Fig. 6

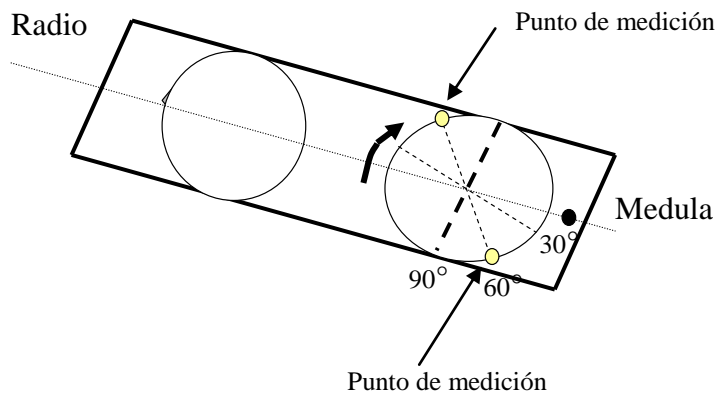
Primera forma: Localización de puntos de medición radial y tangencial.



A fin, de analizar la variación angular de los valores de la velocidad entre la dirección radial y la tangencial, se localizaron puntos a lo largo del eje y se trazándose circunferencias de 10cm de radio, ubicando luego puntos desde el eje radial con dirección a la medula hasta la dirección tangencial con ángulos entre: 0°, 30°, 60°, 90°, 270°, 300° y 330°. Fig. 7

Fig. 7

Segunda forma: Localización de los puntos de medición angular



5.3.- Determinación de las propiedades físicas.-

Densidad.-

$$\rho = \frac{m}{V}$$

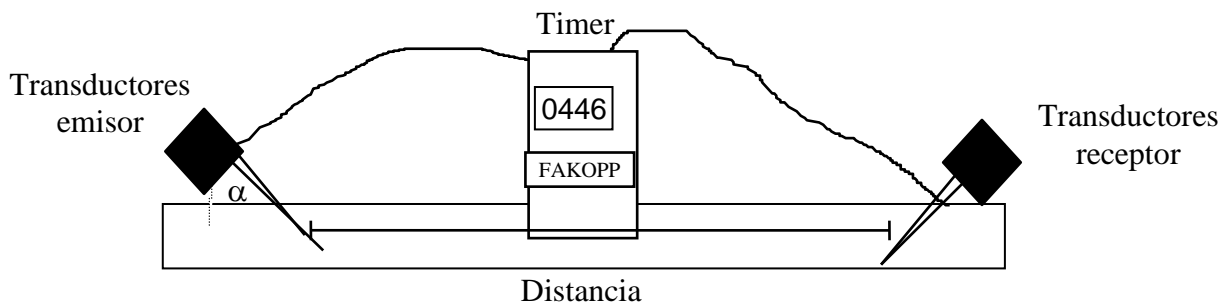
Donde: masa al contenido de humedad estudiado, V= volumen al mismo contenido de humedad.

5.4 Descripción del equipo

Microsecond timer

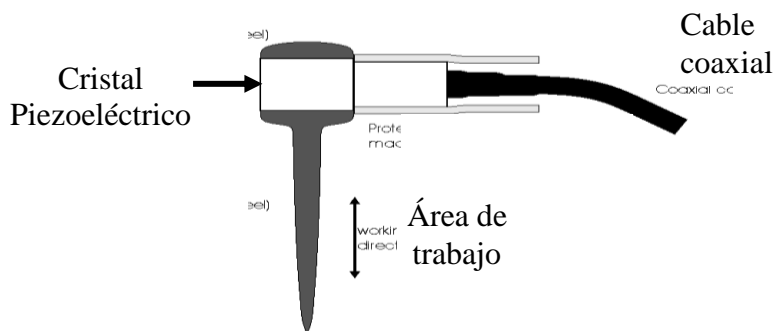
El equipo consta de dos transductores, uno de ellos funciona como emisor y el otro como receptor de la señal y un sistema de medición del tiempo de propagación (timer). Fig 8, 9 y 10.

Fig, 8
Equipo de ultrasonido Microsecond timer



Transductores: Son electrodos con cristales incorporados en su cabeza cuyas frecuencias de resonancia están en los 23kHz. Fig. 9

Fig., 9 Transductores

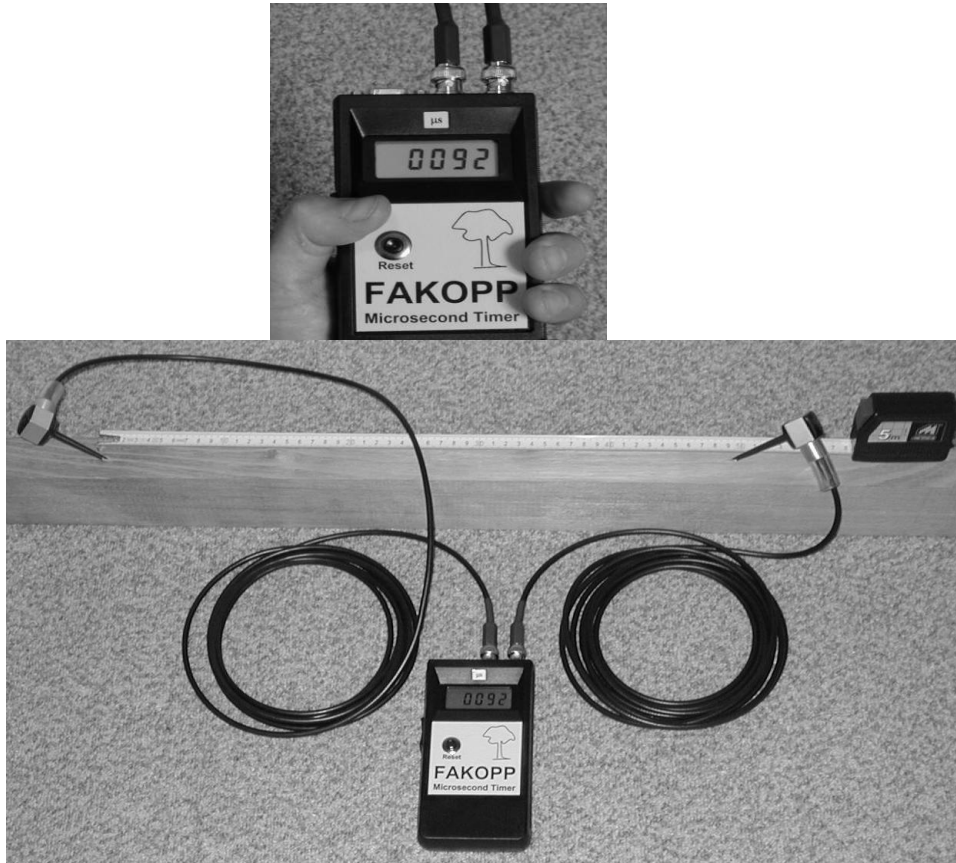


Fuente: Fakopp Interprise

Timer: Medidor de tiempo de propagación en microsegundos con precisión de $0,5 \mu\text{s}$, fig 10.

Sistema de excitación del transductor de emisión: Martillo de excitación.

Fig 10
Microsecond Timer



Calibración: El procedimiento de calibración del equipo tiene como finalidad fijar el cero de medición del equipo, es decir cuando los electrodos están juntos el equipo deberá medir $0,0 \mu\text{s}$. Para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- Prepara un listón de madera de 100 de longitud y $2 \times 2 \text{cm}$ de sección,
- Colocar el transductor de recepción en uno de los extremos, con un ángulo aproximado de 60° con respecto al listón como se muestra en la fig.10,
- Colocar el otro transductor el de emisión en el otro extremo y se procede a generar un pulso con el martillo en la cabeza del transductor, midiendo el tiempo de trasmisión,
- Repetir el procedimiento anterior 10 veces disminuyendo las distancia entre los electrodos en 10cm cada vez,
- Construir un grafico tiempo vs distancia,

- Extrapolar linealmente para $L = 0$,
- Leer el tiempo de corrección t_0 .

Luego la velocidad de propagación de la señal estará dada por:

$$V = \frac{L}{t - t_0} \quad 17$$

Ultrasonic timer

Descripcion del equipo.-

El equipo consta de dos transductores, uno de ellos funciona como emisor y el otro como receptor de la señal y un sistema de medición del tiempo de propagación (timer). Fig 11 y 12.

Fig 11

Transductores del equipo Ultrasonic Timer

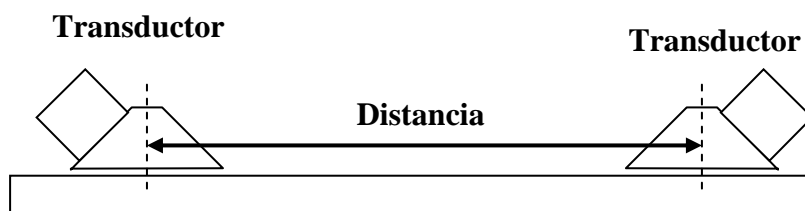
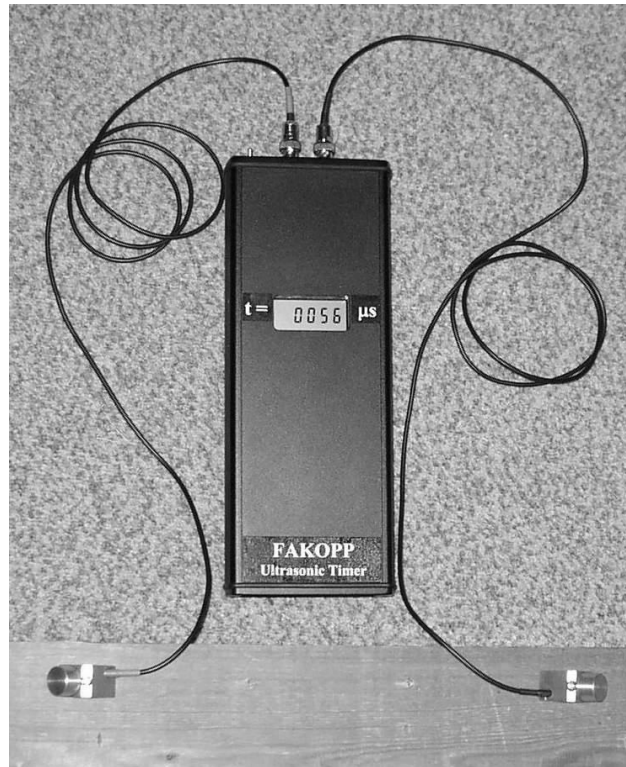


Fig. 12

Equipo Ultrasonic Timer



Calibración: El procedimiento de calibración tiene como finalidad fijar el cero de medición del equipo, es decir cuando los electrodos están juntos el equipo deberá medir $0,0 \mu\text{s}$. Para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- Preparar un listón de madera de 100 de longitud y $2 \times 2 \text{cm}$ de sección,
- Colocar un transductor de los extremos como se muestra en la Fig. 12,
- Colocar el otro transductor extremo activar el generador y medir el tiempo de transmisión de la señal,
- Repetir el procedimiento anterior 10 veces disminuyendo las distancia entre los electrodos en 10cm cada vez,
- Construir un grafico tiempo vs distancia,
- Extrapolar linealmente para $L = 0$,
- Leer el tiempo de corrección t_0 .

Luego la velocidad de propagación de la señal se determina haciendo uso de la ecuación 17.

6. Resultados

6.1 Densidad

Las maderas fueron identificadas en el laboratorio de Anatomía de la Madera. y la determinación de la densidad y humedad en el Laboratorio de Propiedades

Mecánicas de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria. Las muestras se obtuvieron haciendo corte transversales entre 3-4 cm (dirección radial) de ancho y 10-12cm de largo (dirección tangencial) en la posición radial que se indica en el cuadro 2, Fig. 17.

Cuadro 2
Densidad y humedad de las muestras

Rodaja N°	Lado	Diámetro de la rodaja (cm)	Muestra N°	Posición de la muestra con respecto a la medula (cm)	Humedad %	Densidad al 13,3% (g/cm ³)	Peso específico
1	A	33,0	1	14,5	13,43	0,52	0,46
1	A	33,0	2	25,3	13,61	0,57	0,50
1	B	24,5	1	14,5	13,32	0,52	0,46
1	C	21,5	1	14,5	13,19	0,50	0,44
1	D	31,0	1	14,3	13,47	0,50	0,44
1	D	31,0	2	25,0	13,97	0,56	0,49
2	A	29,2	1	14,7	13,59	0,53	0,47
2	A	29,2	2	23,8	13,21	0,54	0,48
2	B	17,5	1	10,2	12,77	0,50	0,44
2	C	25,6	1	14,7	12,94	0,48	0,43
2	C	25,6	2	9,5	13,14	0,43	0,38
2	C	25,6	3	19,9	13,11	0,51	0,45
2	D	20,9	1	11,2	13,45	0,50	0,44
3	A	27,5	1	12,0	13,75	0,52	0,45
3	A	27,5	2	22,5	13,35	0,56	0,50
3	B	30,1	2	10,0	13,55	0,54	0,47
3	B	30,1	3	20,7	13,56	0,62	0,55
3	C	29,2	1	11,0	13,51	0,48	0,42
3	C	29,2	2	25,5	13,49	0,63	0,55
4	A	17,0	1	12,0	12,26	0,47	0,42

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se muestran las rodajas con los lados A, B, C y D de estudio correspondiente. La rodaja 4 se muestra completa debido que solo se obtuvo solo un corte. En la Fig. 17 se muestra la colocación de los equipos Ultrasonic y Microsencong con sus respectivos electrodos.

Fig. 13
Muestra 1 lados A, B, C y D

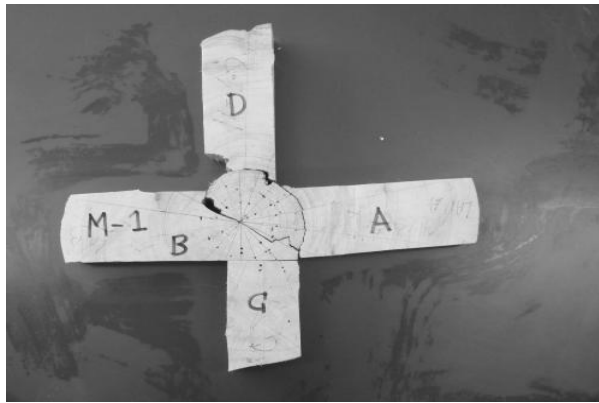


Fig. 14

Muestra 2 lados A, B, C y D

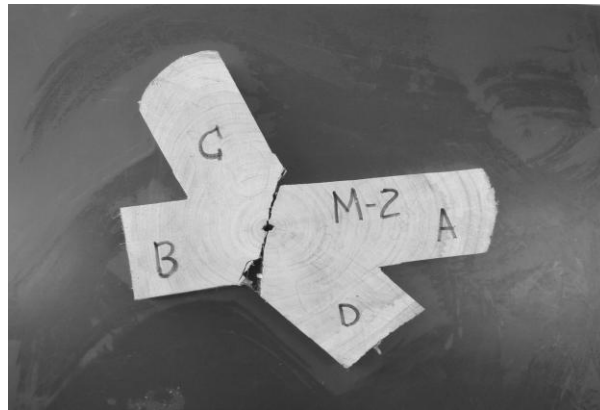


Fig. 15

Muestra 3 lados A, B, C y D

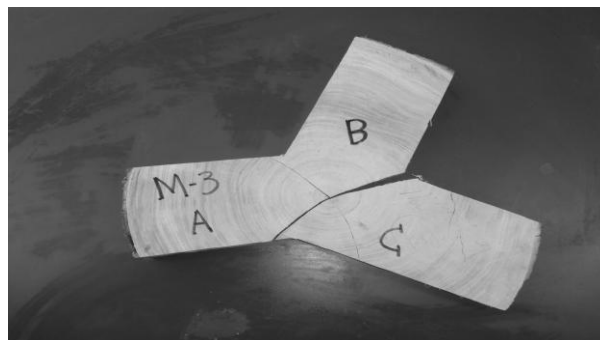


Fig. 16

Muestra 4

Descripción de la muestra para la determinación de la densidad.

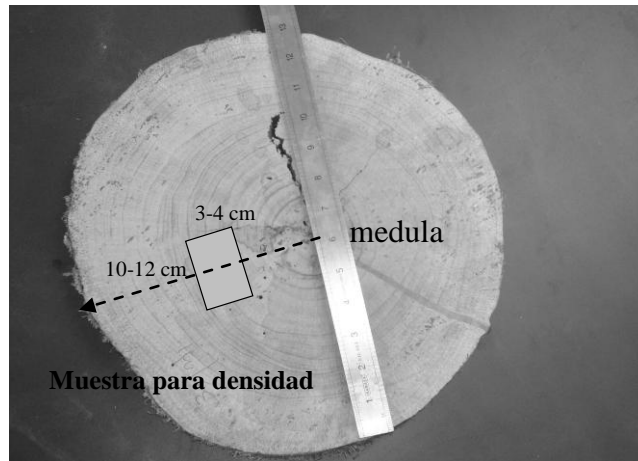
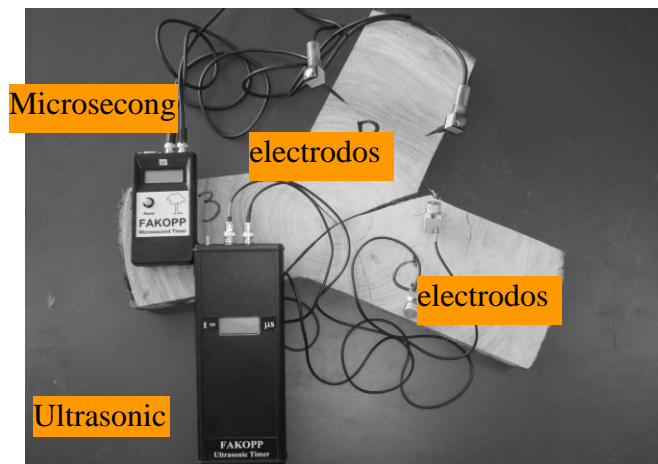


Fig. 17

Se muestra la rodaja 3 con los equipos de medición Ultrasonic 45kHz y Microsecong



6.2.- Madera de Tensión

De acuerdo con las mediciones en las rodajas 1 y 2 podemos notar que la relación de velocidades promedio entre los lados más anchos (zona de tensión) y los más cortos (zona no tensionada) dan valores menores que 1,00 para la rodaja 1 y mayores que 1,00 para la rodaja 2 tanto para la dirección radial y tangencial como para las frecuencias de medición de 45 y 23 kHz.

Cuadro 3

Relación entre las velocidades promedio de la zona de tensión y no tensión

	Mediciones a 45kHz	Mediciones 23kHz
--	---------------------------	-------------------------

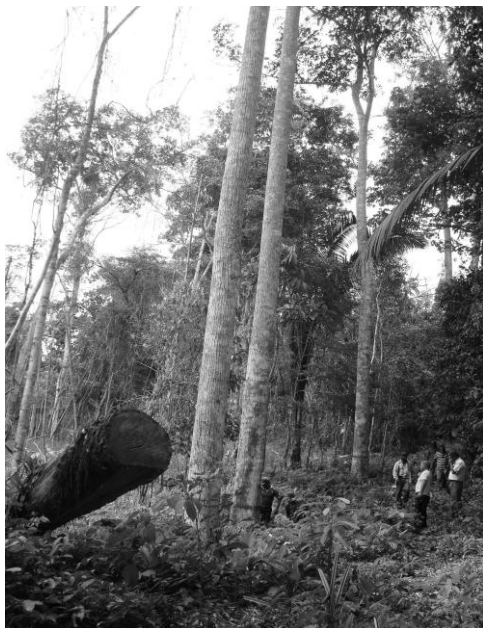
Muestra	V_T/V_{nT} radial	V_T/V_{nT} tang.	V_T/V_{nT} radial	V_T/V_{nT} tang.
1	0,86	0,94	0,99	0,94
2	1,07	1,35	1,01	1,02

Donde: V_T = Velocidad en el lado tensionado (m/s); V_{nT} = Velocidad en el lado no tensionado.

En el cuadro 3 se muestra que el árbol 1 cumple con lo expresado por L1 et al (2007) sin embargo en el árbol 2 no se nota este comportamiento. En las fotos, Fig 18 podemos notar que el caso del árbol Tornillo esté posee además de sus raíces, aletas basales orientadas generalmente hacia las laderas, que sirven de sustentación al árbol y hacen engrosar las rodajas en esos lados, dando la idea en la troza de la existencia de madera de tensión, lo que explicaría en parte el comportamiento anómalo encontrado con las razones entre las velocidades, ya mencionadas.

Fig.18

Fotos del Árbol de Tornillo y de un tocón de tornillo en la zona de estudio donde se muestra las aletas de sustentación



6.3 Comportamiento de las velocidades de las ondas longitudinales en las direcciones radiales y tangenciales.

Se midieron las velocidades radiales y tangenciales en las diferentes rodajas como se muestran en los Anexos 1,2 y 3.

El comportamiento de las velocidades tanto en la dirección radial como tangencial no sigue un comportamiento similar al comparar las mediciones hechas a 45 y 23kHz, como se muestra en las figuras 19, 20, 21 y 22.

Este comportamiento diferente entre las ondas longitudinales de 45 y 23kHz dentro de la muestra depende mucho del tamaño de los obstáculos encontrados en a lo largo del camino seguido por cada tipo de onda, que en el caso de 45kHz tiene casi la mitad de la longitud de la onda de 23kHz.

Fig. 19A.-Velocidades radiales a 45 y 23 kHz de la Muestra 1

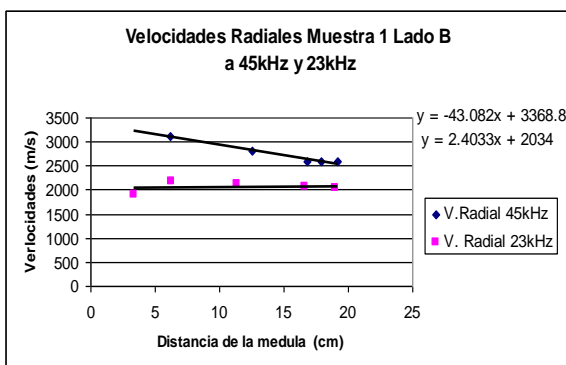


Fig.-19B.-Velocidades tangenciales a 45 y 23 kHz de la Muestra 1

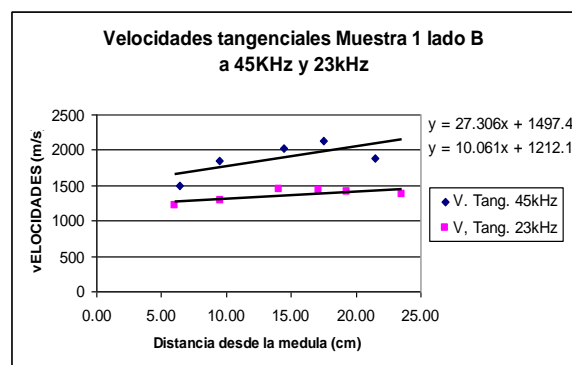


Fig. 20A.-Velocidades radiales a 45 y 23 kHz de la Muestra 2

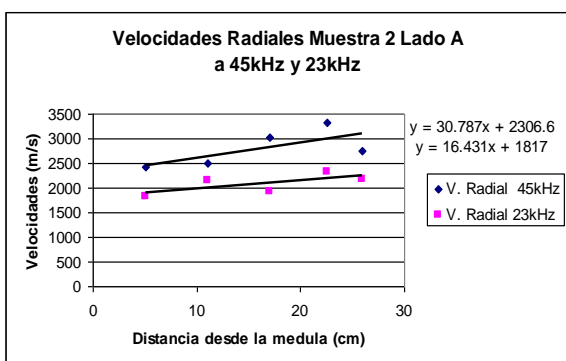


Fig. 20B.-Velocidades tangenciales a 45 y 23 kHz de la Muestra 2

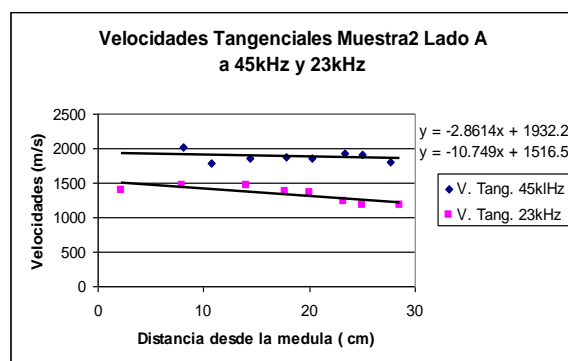


Fig. 21A.-Velocidades radiales a 45 y 23 kHz de la Muestra 3

Fig. 21B.-Velocidades tangenciales a 45 y 23 kHz de la Muestra 3

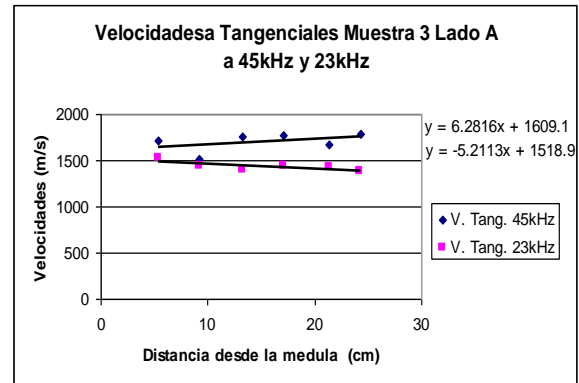
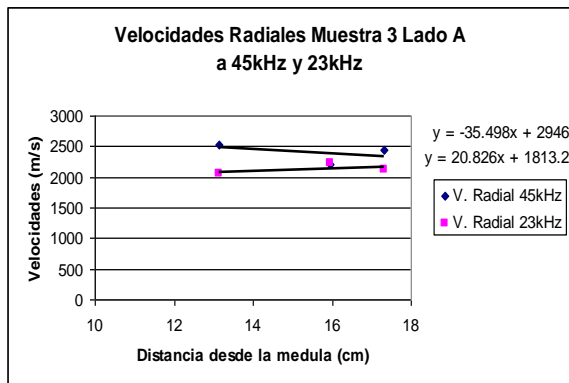
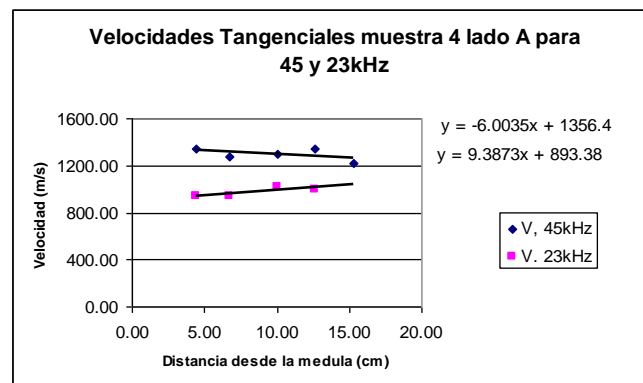


Fig 22.- Velocidades tangencial a 45 y 23 kHz de la Muestra 4



6.4 Comportamiento angular de las velocidades de las ondas longitudinales desde la dirección radial a la tangencial.

Como se muestran en la figuras del 23 a la 26, el comportamiento de las mediciones de las ondas de 45 y 23kHz son muy similares, debido posiblemente por que se efectuaron en un área muy limitada de aproximadamente 10cm de diámetro, como se muestra en la fig 7, zona donde la madera internamente es más uniformes y la propagación de las ondas de 45 y 23kHz no son muy perturbadas.

Haciendo uso del factor de simetría propuesto por Li et al (2007) de la ecuación 15, podemos obtener para las muestras de Tornillo los factores que se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4

Factor de Asimetría para las muestras de Tornillo

Equipo	Factor de asimetría	Desviación estándar
Ultrasonic (45kHz)	0,33	0.075
Microsecong (23kHz)	0,36	0.017

El cuadro 4, muestra que el equipo Microsecong se acerca mejor a los valores encontrados por Li et al (2007) para las especies mencionadas ($F_a = 0,37$) y además posee una desviación estándar mucho menor que el equipo Ultrasonic, demostrando que la frecuencia de 23kHz permite mediciones más uniformes y de mejor precisión.

Fig. 23.-Distribución angular de las Velocidades a 45 y 23 kHz de la Muestra 1

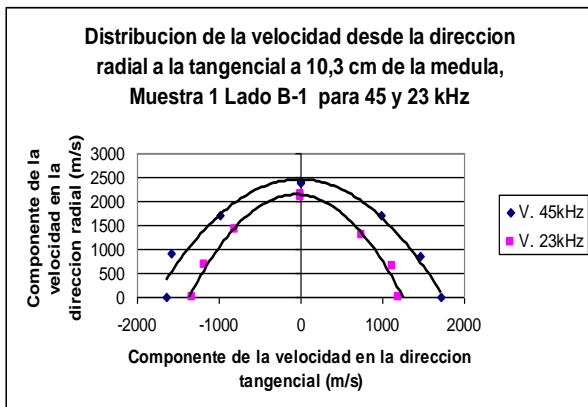


Fig 25.-Distribución angular de las Velocidades a 45 y 23 kHz de la Muestra 3

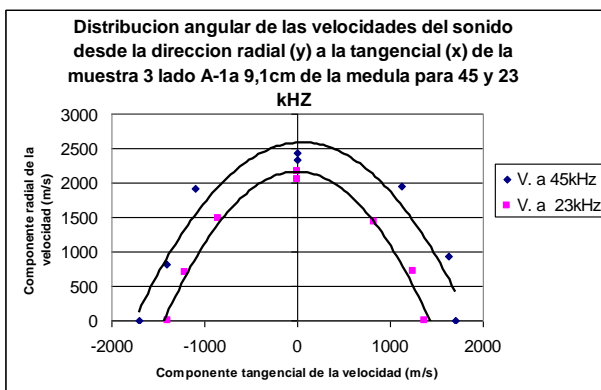


Fig. 24.-Distribución angular de las Velocidades a 45 y 23 kHz de la Muestra 2

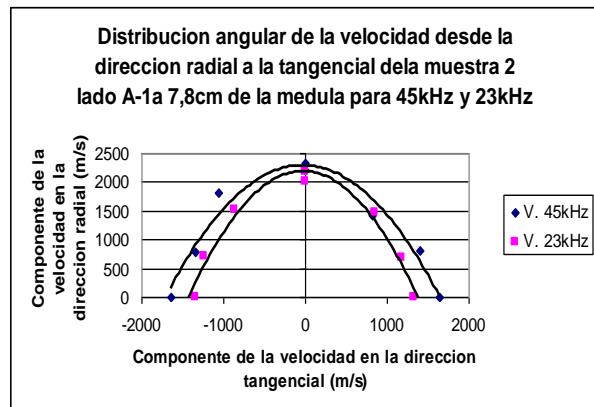
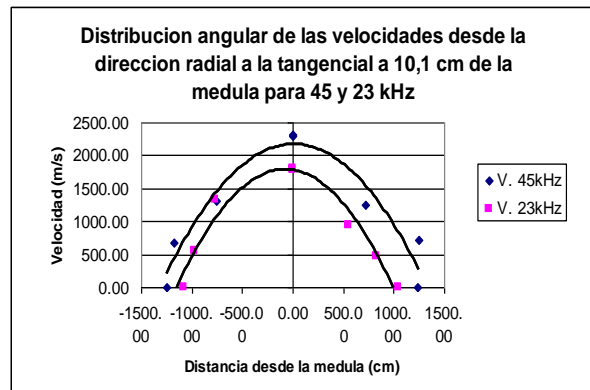


Fig 26.-Distribución angular de las Velocidades a 45 y 23 kHz de la Muestra 4



6.5 Determinación de los Coeficientes :C11, C22 y C33 del Tornillo

Usando las ecuaciones 12 y 14 y habiendo determinado previamente las velocidades y densidades de las muestras estudiadas podemos calcular los valores de los coeficientes C22 y C33 del tensor de rigidez para el Tornillo como se muestran en los Anexos 4, 5 y 6 del presente trabajo. En base a los datos obtenidos en los anexos 4, 5 y 6 se determinaron el promedio de los valores de los coeficientes, C22 y C33 para todas las rodajas. Y haciendo uso del estudio sobre las propiedades mecánicas del Tornillo efectuado por Sucksmith (2007), en la misma plantación de Von Humboldt y con la misma metodología, pudimos determinamos el coeficiente longitudinal C11 promedio del total de muestras para la zona comprendida entre la medula y la albura de cada rodaja, como se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5

Tabla de los Coeficientes C11, C22 y C33 del tensor de rigidez del Tornillo

	C11(Longitudinal (GP)	C22 (Tangencial) (GP)	C33(Radial) (GP)
45kHz	12,07*	1,73 ± 0,35	2,57 ± 0,45
23kHz	11,92*	0,82 ± 0,11	1,92 ± 0,21
Flexión dinámica	10,62*		
Flexión estática	10,22*		

*Fuente Sucksmith (2007)

Las diferencias encontradas con el uso de las frecuencias de 45 y 23 kHz fueron analizadas anteriormente y se deben principalmente a los siguientes factores: a los obstáculos internos como rajaduras, nudos y anillos de crecimiento etc y además que la velocidad de propagación depende inversamente a la longitud de la onda.

En el cuadro 5 podemos notar que la razón entre los coeficientes longitudinales y transversales (L/T y L/R) como entre los coeficientes Radiales y Tangenciales (R/T) se encuentran entre 7 ; 4,7 y 1,5 para 45kHz y entre 14,5; 6,2 y 2,3 para 23kHz valores coherentes a los encontrados por Pico (2004) para el Eban de 5, 4,3 y 1,5 y para el Nogal de 8,3; 4,1 y 2,3 respectivamente para la onda de 1mHz. Y a los encontrados por Bucur (1987) para la madera de Haya 10,6; 5,3; y 2,0 y para el Abeto 21,9; 11,4; y 1,9 respectivamente para velocidades superficiales.

Cuadro 6
Razón entre los coeficientes
C11, C22 y C33

Factor	45KHZ	23kHz
C11/C22	7,0	14,5
C11/C33	4,7	6,2
C33/C22	1,5	2,3

7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Existen discrepancias entre las mediciones de 45 y 23 kHz ya que sus modos de propagación dependen de sus longitudes de onda y de los obstáculos propios de cada muestra como son rajaduras internas, nudos, anillos de crecimiento y otros, haciéndose más notorio cuando se compara muestra de mayor tamaño (15-20 cm o más).
- De otro lado, en muestras con dimensiones menores a lo indicado (<15cm) los comportamientos entre los 2 modos de propagación se hace más cercanos, como se demuestra en las distribuciones angulares encontradas con factores de asimetría de 0,33 y 0,36 para las ondas de 45 y 23kHz. Sin embargo, se encontró que la onda de 23kHz posee una mejor performance debido a su menor dispersión de sus medidas con desviaciones estandares de 0,11 y 0,21 para las direcciones tangenciales y radiales respectivamente.
- De los valores encontrados en el cuadro 5 podemos notar la importancia de la caracterización completa en el estudio de las diferentes maderas ya que solamente con el coeficiente normalmente estudiado C11 no puede notarse la respuesta de elementos estructurales construidos a esfuerzos laterales y de torsión.
- La determinación de los coeficientes C_{22} y C_{33} permiten saber la forma del crecimiento de los árboles en especial la madera de reacción, ya que valores altos de estos coeficientes hacen que el árbol sea menos susceptible procesos de torsión y evitan los granos entrecruzados.
- En el caso del árbol de Tornillo la madera de reacción (tensión) no se encuentra necesariamente relacionada con el engrosamiento fuste ya el mismo puede estar relacionada por la formación de aletas basales.
- Con la finalidad de caracterizar completamente la madera de Tornillo se recomienda efectuar estudios para caracterizar completamente sus coeficientes del tensor de rigidez.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- **Acevedo M., Kikata Y.** 1994 .- Atlas de Maderas Peruanas. Edición Universidad Agraria La Molina. Lima Peru.
2. - **Bodig J, Jayne B.** 1982. – Mechanics of Wood and Wood Composites, Van Nostrand Reinhold Company.
3. - **Bucur V.** 1984.- Ondes Ultrasonores dans le Bois Caracterisation Mecanique et Qualite de Certaines Essences de Bois. These de Docteur Ingenieur. Institut Superieur des Materiaux ety de la Construction Mecanique,
4. - **Bucur V:** 1995.Acoustics of Wood. CRC press.
5. - **Bucur V. y Rocaboy F** 1988b.Surface wave Propagation in Wood: Prospective method for Determination of Wood off-diagonal Terms of Stiffness Matriz Ultrasonic. 26(5), 344-347
- 6.- **Chan M.;** Araujo O; Azueta M. 2002. Los Defectos Naturales en las Madera Aserrada. Ingenieria 6-1 29-28
- 7.- **INIA** .Maderas del Perú.- www.congreso.gob.pe/comisiones/1999/ciencia
- 8.- **INIA**, 1983, Libro del Área Experimental de Regeneración Natural o Bosques Demostrativos
- 9.- **Li J,** et al 2007. Detection of Tension Wood in Eucalypt Discs Using Ultrasonic and Stress Wave Techniques. Proceedings of the 15th Internationa Symposium on Nondestructive testing of Wood.
10. - **Maeglin, R.** 1987. Juvenile Wood, Tension Wood, and Growth Stress Effects on Processing Hardwoods. In: Applying the latest research to Hardwood problems: Proceedings of the 15th annual hardwood symposium of the Hardwood Research Council. Hardwood Research Council. EUA.
11. - **Pico R.** 2004. Medidas de las Constantes elásticas de maderas densas por métodos ultrasonicos, Revista de Acustica N° 35.
- 12.- **Sucksmith K.** 2009. Evaluación Del Módulo De Elasticidad Por Métodos No Destructivos En La Madera *Cedrelinga Cateniformis* Ducke Proveniente De Plantaciones Del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt, Tesis. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- 13.- **Reynel, C. et al.** 2003. Árboles útiles de la Amazonia Peruana y sus Usos. Perú. 509 p.
14. - **Wang, X. et al.** 2001. Wood and Fiber Science, 33(4). Nondestructive Evaluation of Standing Trees with a Stress Wave Method.

**ANEXO1 :
Cuadro de velocidades Radiales y Tangenciales**

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)
1	A	3.8	2214.2	3.2	2022.1	4.2	1941.4	4.8	1195.6
1	A	13.3	2436.9	6.3	1980.4	13.5	2086.8	10.6	1035.2
1	A	16.1	2562.7	10.8	1822.8	20.1	2178.4	12.3	1169.0
1	A	20.2	2571.2	14.7	1965.1	27.8	2336.5	14.4	1276.1
1	A	27.7	2823.1	17.8	1907.0			17.7	1340.3
1	A			20.8	1662.9			20.7	1367.3
1	A			23.8	2188.3			23.7	1352.8
1	A			29.9	1708.4			26.7	1314.0
1	B	6.2	3116.2	6.5	1500.7	3.4	1915.0	6.1	1220.7
1	B			9.5	1846.1	6.2	2165.8	9.6	1291.9
1	B	12.6	2817.8	14.4	2017.9	11.4	2128.9	14.1	1442.8
1	B	16.9	2600.5	17.5	2131.4	16.6	2064.3	17.1	1425.7
1	B	18.0	2579.1	21.5	1884.5	19.0	2032.4	19.3	1414.8
1	B	19.2	2596.3					23.6	1380.1
1	C	10.1	2584.9	6.7	1349.3	9.1	2400.1	8.1	1262.1
1	C	17.1	2667.6	11.4	1961.4	14.0	2242.6	11.4	1380.1
1	C			13.6	1709.5	18.5	2338.4	13.6	1420.3
1	C			16.5	2088.8			16.5	1363.2
1	C			20.5	2136.3			18.4	1394.7
1	D					4.2	2145.9	2.6	1325.2
1	D	6.0	2393.9	6.5	2105.1	12.4	2240.3	10.6	1148.4
1	D	14.3	2204.3	10.6	1587.2	16.1	1947.8	14.1	1194.0
1	D	21.7	2143.6	14.1	1432.7	20.1	2137.3	18.1	1302.5
1	D	25.6	2226.6	18.1	1409.6	23.7	2462.4	22.0	1252.5
1	D	20.1	2259.1	22.0	1686.6	27.2	2336.9	25.3	1395.7
1	D			25.3	1695.2			29.1	1435
1	D			29.1	1344.7				

ANEXO 2 :
Cuadro de velocidades Radiales y Tangenciales

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)
2	A	5.0	2433.1	8.1	2023.4	5.0	1832.9	2.2	1388.7
2	A	11.0	2497.2	10.8	1779.1	11.0	2155.5	7.9	1465.6
2	A	17.1	3024.3	14.4	1862.7	17.1	1932.6	14.1	1468.0
2	A	22.5	3328.4	17.8	1876.1	22.5	2336.6	17.8	1371.6
2	A	25.9	2759.8	20.2	1858.4	25.9	2166.7	20.0	1362.0
2	A			23.3	1924.9			23.2	1226.6
2	A			25.1	1907.4			25.1	1178.3
2	A			27.6	1804.4			28.6	1179.3
2	B	6.5	2418.9	3.4	958.2	4.1	2207.2	6.6	1299.2
2	B	10.9	2150.4	6.6	1388.8	9.0	2103.7	11.5	1338.7
2	B			11.5	1470.2	13.4	2059.4	15.3	1254.2
2	B			15.3	1690.0				
2	C	7.8	2846.3	3.9	2415.9	7.8	2040.9	7.5	1297.3
2	C	15.6	2484.1	7.5	1881.2	15.6	2037.6	11.8	1319.6
2	C	20.4	2221.5	11.8	1898.0	22.4	2087.3	15.6	1409.5
2	C			15.6	1529.5	11.6	1952.6	19.5	1330.6
2	C			19.5	1889.6			23.5	1340.8
2	C			23.5	1584.3				
2	D	8.4	2370.1	4.6	1066.7	8.4	1902.5	4.6	1236.9
2	D	15.5	3157.1	7.9	1600.9	15.5	1994.5	7.9	1486.5
2	D	11.8	2544.9	12.1	1497.5	11.8	2077.2	12.1	1347.6
2	D	14.1	2739.7	15.8	1470.2	14.1	1866.5	15.8	1340.1
2	D			18.9	1386.0			18.9	1200.9

ANEXO 3 :
Cuadro de velocidades Radiales y Tangenciales

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)	Dist. Medula (cm)	Velocidad radial (m/s)	Dist. medula (cm)	Velocidad tangencial (m/s)
3	A	16.0	2199.5	5.4	1711.9	16.0	2222.2	5.4	1535.5
3	A	17.3	2452.7	9.2	1513.2	17.3	2122.2	9.2	1442.0
3	A	13.1	2537.5	13.3	1763.5	13.1	2062.2	13.3	1395.7
3	A			17.1	1776.5			17.1	1447.4
3	A			21.4	1676.9			21.4	1428.3
3	A			24.3	1782.2			24.2	1392.9
3	B	8.8	2474.7	4.8	1832.9	8.8	2041.4	4.8	1556.8
3	B	20.3	2589.2	7.8	1547.9	10.3	2157.7	7.8	1281.1
3	B	23.8	2483.7	11.8	1421.6	20.3	2006.6	12.7	1147.6
3	B			16.7	1756.2	23.8	1977.0	16.7	1173.2
3	B			20.1	1764.9			20.1	1326.5
3	B			23.9	1270.5			23.9	1144.2
3	B			27.5	1612.0			27.5	1220.8
4	A	8.6	2193.3	4.4	1343.7	8.6	1655.5	4.4	937.5
4	A	9.9	1968.7	6.7	1274.1	9.9	1563.4	6.7	941.7
4	A	11.0	2196.0	10.1	1301.4	11.0	1879.1	10.1	1013.4
4	A			12.7	1348.1			12.7	999.0
4	A			15.3	1219.2				

**ANEXO 4 :
Cuadro de Coeficientes C33 y C22 del tensor de rigidez del Tornillo
a 45 y 23 kHz**

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang. (Pa)	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang (Pa)
1	A	13.3	3.1E+09			13.5	2.3E+09	10.6	5.6E+08
1	A	16.1	3.4E+09	10.8	1.7E+09	20.1	2.7E+09	12.3	7.1E+08
1	A	20.2	3.8E+09	14.7	2.0E+09	27.8	3.1E+09	14.4	8.5E+08
1	A	27.7	4.5E+09	17.8	1.9E+09			17.7	9.3E+08
1	A			20.8	1.6E+09			20.7	1.1E+09
1	A			23.8	2.7E+09			23.7	1.0E+09
1	A			29.9	1.7E+09			26.7	9.8E+08
1	B								
1	B	12.6	4.1E+09	14.4	2.1E+09	11.4	2.4E+09	14.1	1.1E+09
1	B	16.9	3.5E+09	17.5	2.4E+09	16.6	2.2E+09	17.1	1.1E+09
1	B	18	3.5E+09			19	2.1E+09		
1	B								
1	C	17.1	3.6E+09	11.4	2.0E+09	14	2.5E+09	11.4	9.5E+08
1	C			13.6	1.5E+09	18.5	2.7E+09	13.6	1.0E+09
1	C			16.5	2.3E+09			16.5	9.3E+08
1	D					12.4	2.5E+09	10.6	6.6E+08
1	D	14.3	2.4E+09	10.6	1.3E+09	16.1	1.9E+09	14.1	7.1E+08
1	D	21.7	2.6E+09	14.1	1.0E+09	20.1	2.6E+09	18.1	8.5E+08
1	D	25.6	2.8E+09	18.1	9.9E+08	23.7	3.4E+09	22	8.8E+08
1	D	20.1	2.9E+09	22	1.6E+09	27.2	3.1E+09	25.3	1.1E+09
1	D			25.3	1.6E+09			29.1	1.2E+09

ANEXO 5 :
Cuadro Coeficientes C33 y C22 del Tensor de Rigidez del Tornillo
a 45 y 23 kHz

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang. (Pa)	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang. (Pa)
2	A	5.0	3.0E+10			5.0	1.7E+10		
2	A	11.0	6.9E+10	10.8	1.7E+09	11.0	5.1E+10		
2	A	17.1	1.6E+11	14.4	1.8E+09	17.1	6.4E+10	14.1	1.1E+09
2	A	22.5	2.5E+11	17.8	1.9E+09	22.5	1.2E+11	17.8	1.0E+09
2	A	25.9	2.0E+11	20.2	1.9E+09	25.9	1.2E+11	20.0	1.0E+09
2	A			23.3	2.0E+09			23.2	8.1E+08
2	A			25.1	2.0E+09			25.1	7.5E+08
2	A			27.6	1.8E+09			28.6	7.5E+08
2	B	6.5	3.8E+10	3.4	0.0E+00	4.1	2.0E+10	6.6	8.4E+08
2	B	10.9	5.0E+10	6.6	9.6E+08	9.0	4.0E+10	11.5	9.0E+08
2	B			11.5	1.1E+09	13.4	5.7E+10	15.3	7.9E+08
2	B			15.3	1.4E+09				
2	C	7.8	6.3E+10			7.8	3.3E+10	7.5	7.2E+08
2	C	15.6	9.6E+10	7.5	1.5E+09	15.6	6.5E+10	11.8	7.5E+08
2	C	20.4	1.0E+11	11.8	1.5E+09	22.4	9.7E+10	15.6	9.5E+08
2	C			15.6	1.1E+09	11.6	4.4E+10	19.5	8.5E+08
2	C			19.5	1.7E+09				
2	C								
2	D	8.4	4.7E+10			8.4	3.0E+10		
2	D	15.5	1.5E+11	7.9	1.3E+09	15.5	6.2E+10	7.9	1.1E+09
2	D	11.8	7.6E+10	12.1	1.1E+09	11.8	5.1E+10	12.1	9.1E+08
2	D	14.1	1.1E+11	15.8	1.1E+09	14.1	4.9E+10	15.8	9.0E+08

ANEXO 6 :
Cuadro Coeficientes C33 y C22 del tensor de Rigidez del Tornillo a 45 y 23 KHz

ULTRASONIC 45kHz						MICROSECONG 23kHz			
Rodaja	Lado	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang. (Pa)	Dist. Medula (cm)	C33 radial (Pa)	Dist. medula (cm)	C22 tang. (Pa)
3	A	16.0	2.5E+09			16.0	2.6E+09		
3	A	17.3	3.1E+09	9.2	1.2E+09	17.3	2.3E+09	9.2	1.1E+09
3	A	13.1	3.3E+09	13.3	1.6E+09	13.1	2.2E+09	13.3	1.0E+09
3	A			17.1	1.6E+09			17.1	1.1E+09
3	A			21.4	1.6E+09			21.4	1.1E+09
3	A			24.3	1.8E+09			24.2	1.1E+09
3	B	8.8	3.3E+09	4.8		8.8	2.3E+09		
3	B	20.3	4.2E+09	7.8	1.3E+09	10.3	2.5E+09	7.8	8.9E+08
3	B	23.8	3.8E+09	11.8	1.1E+09	20.3	2.5E+09	12.7	7.1E+08
3	B			16.7	1.9E+09	23.8	2.4E+09		
3	B			20.1	1.9E+09			20.1	1.1E+09
3	B			23.9	1.0E+09			23.9	8.1E+08
3	B							27.5	9.2E+08
4	A	8.6	2.3E+09			8.6	1.3E+09		
4	A	9.9	1.8E+09			9.9	1.1E+09		
4	A	11.0	2.3E+09	10.1	8.0E+08	11.0	1.7E+09	10.1	4.8E+08
4	A			12.7	8.5E+08			12.7	4.7E+08
4	A			15.3	7.0E+08				