

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA  
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH Y SU RELACIÓN CON SUS  
PROPIEDADES MECÁNICAS**

**JAIRO ALEXANDER OSORIO SARAZ**  
**Ingeniero Agrícola**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLIN  
FACULTAD DE MINAS  
ESCUELA DE MATERIALES  
2006**

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA  
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH Y SU RELACIÓN CON SUS  
PROPIEDADES MECÁNICAS**

**JAIRO ALEXANDER OSORIO SARAZ**  
**Ingeniero Agrícola**

**Director**  
**JUAN MANUEL VELEZ RESTREPO**  
**Ph.D Ingeniería**

**Trabajo de Grado presentado como requisito  
parcial para optar la título de Magíster en  
Ingeniería Área Materiales y Procesos**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN**  
**FACULTAD DE MINAS**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÁREA MATERIALES Y PROCESOS**  
**2006**

## **DEDICATORIA**

A Geronimo y Olga, mis razones de ser;  
y a Dios, mi inspiración.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis sinceros agradecimientos a:

Juan Manuel Vélez Restrepo, PhD Ingeniería y Director de este trabajo por sus valiosas orientaciones.

Héctor José Ciro V., Msc, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Eugenia González C., Msc. Profesora Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Piedad Gagnan Phd. Universidad Pontificia Bolivariana

Carlos Oliveros Tascón Phd, Investigador Centro Nacional de Investigación en Café – CENICAFÉ.

Ángela María Vásquez C., Msc. Laboratorio de Productos Forestales, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Robinson y Jorge Estudiantes Doctorado. Universidad Bolivariana.

Meri y Adrian, Laboratorio Metalografía Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Robinson Osorio H. y Germán Wbeimar Guarín G., Ingenieros Agrícolas.

Fernando Pérez, Laboratorio de Productos Forestales, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
<b>2.1 ASPECTOS GENERALES</b>	<b>3</b>
<b>2.2 USOS ACTUALES Y POTENCIALES DE LA GUADUA</b>	<b>6</b>
2.2.1 Construcción	7
2.2.2 Industrialización	7
2.2.3 La guadua como un material en ingeniería	8
<b>2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA GUADUA</b>	<b>10</b>
<b>2.4 CARÁCTERÍSTICAS ANATÓMICAS Y DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL CULMO DEL BAMBÚ</b>	<b>22</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>30</b>
<b>3.1 MATERIAL</b>	<b>30</b>
<b>3.2 METODOLOGÍA</b>	<b>30</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>37</b>
<b>4.1 ANÁLISIS QUÍMICO</b>	<b>37</b>
<b>4.2 ESTRUCTURA INTERNA</b>	<b>38</b>
<b>4.3 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS</b>	<b>56</b>
4.3.1 Densidad	56
4.3.2 Resistencia flexión	62
4.3.3 Resistencia a tensión	74
4.3.4 Relación de Poisson ( $\nu$ )	83
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>90</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación taxonómica de la Guadua	4
Tabla 2. Partes y usos de la Guadua	6
Tabla 3. Áreas con guadua en Colombia por departamento.	6
Tabla 4. Propiedades de la guadua comparada con otros materiales	9
Tabla 5. Resistencia de elementos sometidos a flexión.	15
Tabla 6. Resistencia de elementos sometidos a compresión.	16
Tabla 7. Resistencia última para elementos sometidos a tensión paralela	19
Tabla 8. Resistencia de elementos sometidos a Tensión	19
Tabla 9. Resistencia a tensión del bambú con la presencia o ausencia de nudos.	22
Tabla 10. Propiedades de algunas fibras naturales	24
Tabla 11. Dimensiones de las probetas falladas a flexión en cm	32
Tabla 12. Variables medidas en los ensayos mecánicos a flexión y tensión	34
Tabla 13. Tamaño muestral	36
Tabla 14. Intervalos múltiples de Duncan para porcentaje de parénquima	41
Tabla 15. Intervalos múltiples de Duncan para el número de haces vasculares	45
Tabla 16. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de tejido conductivo	47
Tabla 17. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de fibra	51
Tabla 18. Análisis de varianza para longitud de fibras	52
Tabla 19. Intervalos múltiples de Duncan para la longitud promedio de las células de fibra	53
Tabla 20. Análisis de varianza para espesor en fibras	54
Tabla 21. Intervalos múltiples de Duncan para el espesor de las células de fibra.	55
Tabla 22. Intervalos múltiples de Duncan para la densidad	57

Tabla 23.	Tendencias para predecir la densidad en función de la estructura en el espesor total	59
Tabla 24.	Tendencias para determinación de la densidad en función de la estructura interna en las capas.	61
Tabla 25.	Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia	64
Tabla 26.	Tendencias para determinación de las resistencias máximo en el espesor total en función de la estructura interna	65
Tabla 27.	Tendencias para determinación de las resistencias en función de la estructura interna de las capas	70
Tabla 28.	Resistencias tangenciales máximos en la basa y la cepa al 10 y 13%	71
Tabla 29.	Resistencias radiales máximos en la basa y la cepa al 10% de humedad	71
Tabla 30.	Intervalos múltiples de Duncan resistencia máxima	72
Tabla 31.	Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia máxima	75
Tabla 32.	Tendencias para determinación de la resistencia máxima tensión en el espesor total en función de la estructura interna	78
Tabla 33.	Tendencias para determinación de la resistencia máxima a tensión en las capas en función de la estructura interna	81
Tabla 34.	Análisis de varianza para módulo elástico a tensión (Mpa)	82
Tabla 35.	Intervalos múltiples de Duncan para módulos de elasticidad (Mpa)	82
Tabla 36.	Tendencias para determinación de la relación de Poisson en función de la estructura interna de la basa.	86

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Guadua angustifolia kunth (Judziewics et al, 1999).	2
Figura 2.	División del tallo de la guadua. (Castaño 2004).	5
Figura 3.	La guadua y otros materiales, en relación con E y $\rho$ (Wegst, .G.K Shercliff, 1993).	9
Figura 4.	Humedad Vs. Carga (González et. Al, 2003)	11
Figura 5.	Regresión simple densidad contenido de humedad (Osorio et,al 2005)	12
Figura 6.	Relación entre el diámetro externo y carga en el límite proporcional (Osorio et,al, 2005).	14
Figura 7.	Regresión simple carga –diámetro externo (Osorio et al. 2005).	16
Figura 8.	Regresión simple carga al límite de proporcionalidad espesor pared (Osorio et al, 2005)	17
Figura 9.	Probetas de guaduas a tensión (INBAR, 1999). Vista de frente. B. Vista lateral	18
Figura 10.	Probeta para realizar ensayos a flexión con cargas radiales y tangenciales sobre el material (Ahmad, 2000).	21
Figura 11.	Distribución de los haces vasculares en la sección transversal del culmo del bambú (Liese, 1998).	23
Figura 12.	As vascular con sus partes. A) vasos, b) floema, c) protoxilema, d) células de parenquima, e) fibras. (Liese, 1998)	23
Figura 13.	Distribución de capas en el espesor del elemento	24
Figura 14.	Resistencia a la tensión de algunas fibras naturales	25
Figura 15.	Micrografía de la sección transversal de una fibra de GAK a 222x (Moreno et al. 2004).	26
Figura 16.	Estructura básica de las células de fibra de maderas (Anne et al, 1998)	26
Figura 17.	Modelo de una estructura polilaminar de la fibras del bambú. P: Pared primaria, O: Capa exterior de la paredsecundaria (Parasmewaran y Liese 1976).	27

Figura 18.	Modelo helicoidal de células de fibras (Anne et al, 1998)	28
Figura 19.	Modelo helicoidal de células de fibras (Anne et al, 1998)	30
Figura 20.	<b>A.</b> Probetas con nudo y sin nudo. <b>B.</b> Culmo de Guadua	31
Figura 21.	Lugares para la extracción de las probetas. A) Vista longitudinal B). Vista transversal de la pared del culmo	32
Figura 22.	Probetas para encontrar la Relación de Poisson.	34
Figura 23.	Composición química de la corteza y capa media de la GAK	37
Figura 24.	Composición química de la GAK	38
Figura 25.	Estructura anatómica de la cepa y la basa	39
Figura 26.	Células cortas y largas de parénquima	40
Figura 27.	Distribución de células de parénquima con intervalos LSD	41
Figura 28.	Distribución y forma de los haces vasculares: (F) fibra, (P) Parénquima, (TC) Tejido conductivo	43
Figura 29.	Número de haces vasculares por unidad de área en cada zona con intervalos LSD	44
Figura 30.	Tejido conductivo compuesto por metaxilema, protoxilema y floema	45
Figura 31.	Vasos conductores de protoxilema (P:Parénquima; F: Fibra)	46
Figura 32.	Distribución de tejido conductivo en lacepa y la basa con intervalos LSD	46
Figura 33.	Fibras de la GAK. En el extremo de las fibras, se observa que estas están formadas por unidades menores denominadas células de fibras, que se hallan en tamaños largos y cortos (ver Figura 35).	47
Figura 34.	Células de fibra dentro de la fibra de la GAK	48
Figura 35.	Forma de las células de fibras de la GAK.	48
Figura 36.	Aspectos generales de la estructura de las células de fibras	49

Figura 37.	Espesor de la célula de fibra y del lumen de la GAK.	49
Figura 38.	a) Estructura de la célula de fibra de la GAK. b) multicapas de bambú <i>Phyllostachys viridiglaucescens</i> (Liese, 1998). c) Modelo de la estructura polilaminar multicapas (1998).	50
Figura 39.	Distribución de células de fibra en la cepa y la basa con intervalos LSD	51
Figura 40.	Longitud promedio de fibras por zona en la cepa y la basa con intervalos LSD	52
Figura 41.	Distribución de células de fibras cortas en la cepa y la basa	53
Figura 42.	Espesor de fibras por zona en la cepa y la basa con intervalos LSD	54
Figura 43.	Anastomosis en la región nodal (Liese, 1998).	55
Figura 44.	Longitud promedio de fibras por zona en la cepa y la basa en el nudo.	56
Figura 45.	Densidad a nivel de la cepa y basa en el espesor total	57
Figura 46.	Relación de la densidad con la estructura interna en el espesor total	58
Figura 47.	Densidad en la basa y la cepa en (gr/cm <sup>3</sup> )	60
Figura 48.	Relación de la densidad con la estructura interna en las capas	61
Figura 49.	Resistencia radiales y tangenciales con nudo y sin nudo.	62
Figura 50.	Fallas en el nudo bajo resistencias radiales y tangenciales	63
Figura 51.	Falla por aplastamiento en la zona total	63
Figura 52.	Relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en el espesor total	65
Figura 53.	Resistencias radiales y tangenciales de las capas en la basa	66
Figura 54.	Resistencias radiales y tangenciales en las capas de la cepa	67

Figura 55.	Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa externa	68
Figura 56.	Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa media	68
Figura 57.	Relación de la resistencia máxima a flexión en la capa interna	69
Figura 58.	Módulos de elasticidad con la presencia y ausencia de nudos en la cepa bajo cargas radiales y tangenciales.	74
Figura 59.	Resistencia máxima a tensión	75
Figura 60.	Fallas en el nudo y entrenudo bajo esfuerzos de tensión	77
Figura 61.	Relación del esfuerzo a tensión con la estructura interna en el espesor total	78
Figura 62.	Esfuerzos máximos a tensión en las capas	79
Figura 63.	Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa externa	80
Figura 64.	Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa media	80
Figura 65.	Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa interna	80
Figura 66.	Módulos de elasticidad a tensión en las capas	81
Figura 67.	Relación de Poisson para la basa y la cepa del elemento en cada una de las zonas	83
Figura 68.	Análisis LSD para la Relación de Poisson en la cepa y la basa	84
Figura 69.	Comparación de la relación de Poisson de la Guadua con otros materiales (Gere, j; 2001)	85
Figura 70.	Relación de Poisson con la estructura interna en las capas a nivel de la basa	86

## **ANEXO**

### **UNO. TABLAS DE ANÁLISIS DE VARIANZA**

# **CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH Y SU RELACIÓN CON SUS PROPIEDADES MECÁNICAS**

## **RESUMEN**

Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar la estructura interna de la *Guadua angustifolia kunth* GAK, y encontrar la incidencia que presenta esta estructura en las propiedades mecánicas y físicas como son la resistencia a flexión, tensión, en la relación de Poisson, y la densidad del material.

La estructura interna de la GAK se encuentra compuesta por tejido conductivo cuya función es la de transportar agua y nutrientes, células de parénquima que forman parte fundamental de la matriz del material y ayudan a unir las fibras, las cuales a su vez se encuentran compuestas por unidades menores denominadas células de fibra, y cuya función es dar resistencia al material. Tanto en la cepa como en la basa el porcentaje de fibras disminuye de la capa externa a la interna, mientras el parénquima se comporta de manera contraria, aspecto que incide directamente en la resistencia de cada capa.

La densidad fue significativamente superior en la basa que en la cepa, y esta disminuye de la capa externa a la interna, lo que se debe a que tanto la cantidad, como la longitud y el espesor de las células de fibras, disminuyen hacia la zona interna.

Los esfuerzos aplicados radialmente (en el sentido al radio de la GAK) son ligeramente mayores a los esfuerzos tangenciales, en todas las

capas analizadas. La resistencia a la flexión disminuye de la capa externa a la interna, debido a la reducción de la cantidad de células de fibras en ese sentido. Los valores de resistencia a flexión en la GAK, aumentan con mayores contenidos de humedad, y disminuyen con la presencia de nudos debido a la discontinuidad de las fibras en esa parte del material.

La resistencia a la tensión al igual que la de flexión disminuye de la capa externa a la interna, aspecto que se relaciona con que tanto la cantidad, como la longitud y el espesor de las células de fibra que disminuyen hacia la capa interna.

Los valores encontrados para la relación de Poisson dependen significativamente de la estructura del material variando entre 0,22 y 0,35, haciéndolo un producto altamente heterogéneo y anisotrópico. Los valores de la relación de Poisson en la capa externa y media dependen principalmente del contenido de células de fibras y la capa interna de las células de parénquima.

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la cultura del eje cafetero y últimamente en Departamentos como Cundinamarca y Antioquia, es común el uso de la *Guadua angustifolia kunth* (GAK) en diversas aplicaciones; principalmente en sistemas constructivos y últimamente en la fabricación de pisos y tabletas para laminados, dándole un mayor valor agregado al material.

En el plano internacional el Bambú ha sido ampliamente utilizado desde los años 70, como material estructural o combinado con otros materiales como el concreto. Al igual que en Colombia el uso del bambú manufacturado, por ejemplo, en la fabricación de laminados y paneles ha sido considerablemente difundido, encontrando de esta manera en este un material altamente competitivo en calidad y costos comparado con otros materiales tradicionales.

Este amplio uso del material, ha promovido el desarrollo de investigaciones tanto nacionales como internacionales, orientadas principalmente al conocimiento estructural de los elementos y otras hacia el estudio anatómico, como las realizadas por Liese (1998) en diferentes bambúes y por el Centro de Investigación del Café CENICAFE (2002), en la *Guadua angustifolia kunth*, en donde dan a conocer la composición del material en términos de sus contenidos de fibras, células de parénquima y de tejido conductivo. Así, esta serie de investigaciones han demostrado que la guadua posee propiedades estructurales sobresalientes que la clasifican como clase B, de acuerdo al sistema de clasificación de maderas, y por tanto es utilizada para la construcción de viviendas, puentes y estructuras de soportes entre otros.

Sin embargo, el estudio de la GAK, con el fin de entender la relación que existe entre la estructura interna y la resistencia cuando es sometida a diferentes esfuerzos, especialmente los de flexión y tensión que son los

que mayormente se presentan en estructuras, no ha sido investigado, a diferencia de otros bambúes que se han estudiado internacionalmente.

Así, el Grupo de Trabajo en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, ha orientado sus investigaciones en torno al conocimiento de la GAK como material, y como consecuencia de lo anterior, este trabajo de investigación tuvo como objetivo caracterizar la estructura interna de la guadua y determinar la influencia que presenta en su comportamiento mecánico bajo esfuerzos a flexión y tensión, y en las propiedades físicas como es la densidad, a través de un análisis del espesor total y de cada una de las capas que anatómicamente lo conforman en la cepa y la basa del elemento.

De esta manera se presentan resultados sobre las características de las fibras, la composición de parénquima y tejido conductivo y la incidencia de estos parámetros característicos del material en el comportamiento mecánico del mismo.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ASPECTOS GENERALES

La Guadua es un bambú espinoso perteneciente a la Familia *Poaceae*, a la sub-familia *Bambusoideae*. En 1820, el botánico Kunth, da a conocer este género utilizando el vocablo "guadúa" con el que los indígenas de Colombia y Ecuador se referían a este bambú. Este género, se puede distinguir de los demás participantes por los tallos robustos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares en forma triangular. Sin embargo, sus caracteres más fuertes son la presencia de quillas haladas en la parte del flósculo de la espiguilla, la presencia de 3 estigmas plumosos al final del estilo y 6 estambres (ver Figura 1).



Figura 1. *Guadua angustifolia* kunth  
(Judziewics et al, 1999)

El género *Guadua* reúne las 30 especies de bambúes más grandes y económicamente más importantes de América Tropical, que se distribuye desde México hasta el norte de Argentina, y desde el nivel del mar hasta un máximo de 2600 m, sobre todo en las bajas altitudes (0-1500 m) y en las regiones húmedas. Los únicos países en donde la *Guadua* no crece espontáneamente son Chile y las islas del Caribe (Judziewics et al, 1999).

Según Castaño y Moreno (2004), Colombia, Ecuador y Venezuela son los países donde esta especie crece de manera natural, aunque ha sido introducida a varios países de Suramérica, Centro – América y el Caribe, e inclusive a algunos países de Asia, América del Norte y Europa.

La GAK reúne dos variedades, las cuales se encuentran en Colombia:

- *Guadua angustifolia* var. *Bicolor*, comúnmente conocida como *Guadua rayada*, se distingue por sus culmos verdes con rayas amarillas.
- *Guadua angustifolia* var. *Nigra*, conocida comúnmente como *Guadua negra*, la cual se caracteriza por su culmo verde con manchas negras.

Con base en el estudio molecular de Moreno (2002), se estableció que la diversidad genética de esta especie al menos en el eje cafetero en Colombia, no es significativa; además, que las *Guadua*s conocidas como *cebolla*, *macana*, *cotuda* y *castilla*, son ecotipos o formas adaptadas a condiciones específicas del clima y del suelo. Las *Guadua*s *macana* y *cebolla* han sido importantes en el uso artesanal e industrial en Colombia y Ecuador, y además han jugado un papel fundamental en economías regionales de estos dos países, como el caso del Eje Cafetero en Colombia y de la Costa pacífica en Ecuador.

Según Hidalgo (1974), la GAK presenta la clasificación taxonómica, que es mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la *Guadua*.

<b>Rango</b>	<b>Taxonomía</b>
Género	<i>Guadua</i>
Especie	<i>Angustifolia</i>
Variedad	<i>Bicolor</i>
Forma	<i>Cebolla, Macana, Rayada, Castilla, Negra y Cotuda.</i>

Esta clasificación es importante para la selección del material de acuerdo al uso que se le pretenda dar, ya que la morfometría de la macana presenta diámetros menores con espesores de paredes mayores, que le permite ser utilizada principalmente en columnas, a diferencia de la cebolla cuyo principal uso se da en vigas. La GAK forma cebolla y macana, son las más utilizadas en la industria de laminados y en estructuras.

De acuerdo con lo anterior Hidalgo (1974), da a conocer las diferentes partes que componen la guadúa y sus principales usos a nivel estructural, los cuales se pueden observar en la Figura 2 y en la Tabla 2.

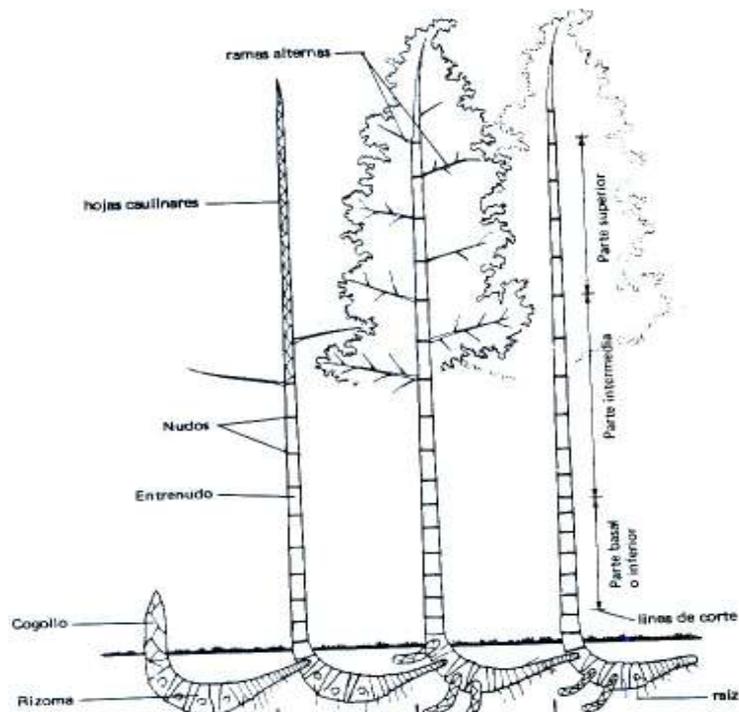


Figura 2. División del tallo de la guadúa.  
(Castaño 2004).

Tabla 2. Partes y usos de la Guadua

<b>Alturas (m)</b>	<b>Partes</b>	<b>Usos</b>
-3 - 0	Rizoma y raíces	Decoración y juegos, uniones en pórticos.
0 - 3	Cepa (Parte inferior)	Columnas, vigas.
3 - 11	Basa (Parte intermedia)	Paredes, casetones, vigas, etc.
11- 18	Varillon (Parte superior)	Correas para techos de hojas o paja.
18- 22	Copa	Se da como nutriente a suelos y animales

Fuente: Hidalgo (1974).

En Colombia según Corporaciones Autónomas Regionales CARs y de acuerdo con el diagnóstico de las áreas donde aparece reportado el género GAK, la Tabla 3 muestra el total de hectáreas plantadas y naturales que existen actualmente cubiertas por este recurso. (Castaño y Moreno 2004).

Tabla 3. Áreas con guadua en Colombia por departamento.

<b>Departamento</b>	<b>Área (has)</b>
Antioquia	1000
Boyacá	500
Caldas	6195
Quindío	8342
Risaralda	4130
Tolima	4221
Valle del cauca	8392
Putumayo y caquetá	2000
Cauca	1800
Otros departamentos	4895
<b>TOTAL</b>	<b>36181</b>

## **2.2 USOS ACTUALES Y POTENCIALES DE LA GUADUA**

Las Corporaciones autónomas regionales de Colombia han encontrado un gran uso de la GAK, en múltiples aplicaciones con beneficios ambientales. No obstante, la expansión de la frontera agrícola, las

actividades humanas no planificadas y su uso propiciaron la disminución de sus áreas al punto que en el país persisten solamente 40.000 hectáreas.

Producto de lo anterior, en los últimos años el gobierno nacional y las corporaciones autónomas han investigado y generado tecnologías básicas para la reproducción, propagación, manejo silvicultural de bosques naturales y plantados y el aprovechamiento sostenido de la guadua; donde el principal objetivo ha sido perpetuar la especie, contribuir al equilibrio ambiental, generar la producción de materias primas para soluciones comunitarias con desarrollo sostenible y recuperarle a la guadua el espacio en el contexto nacional e internacional.

### **2.2.1 Construcción**

Los sistemas constructivos de vivienda lideran los usos y aplicaciones de la guadua en Colombia, no obstante construcciones complementarias como kioscos, iglesias, puentes, centros culturales, etc., demuestran el interés y avance de su aplicación, ahora promovido por diversas instituciones, especialmente por la Sociedad Colombiana del Bambú.

La GAK es un material versátil, de buen comportamiento físico y mecánico. Tiene además una relación resistencia/peso como las mejores maderas, además, de ser un recurso natural renovable de rápido crecimiento y fácil manejo, que además aporta importantes beneficios ecológicos durante su crecimiento. Todas estas características y el haber incursionado ya en procesos de industrialización hacen de la guadua un material con buenas expectativas hacia el futuro. (Castaño y Moreno, 2004)

Según López (2000), el bambú aunque ha sido un material tradicional de construcción por miles de años, tiene sin embargo que ganar estatus de material ingenieril, para lo cual debe cumplir con un requerimiento básico, el cual es tener un conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas a nivel del elemento.

### **2.2.2 Industrialización**

La GAK tiene fibras naturales muy fuertes que permiten desarrollar paneles, aglomerados, pisos, laminados, esteras, pulpa y papel, es decir

productos de calidad que podrían competir con otros materiales en el mercado nacional e internacional.

A pesar de lo anterior, el poco conocimiento que se tiene del material no ha permitido lograr avances significativos en la transformación del producto, presentándose una apertura de mercado tanto interna como externa no muy alta.

### **2.2.3 La guadua como un material en ingeniería**

Como consecuencia del consumismo de materiales tradicionales en construcción, y la baja posibilidad de acceso a ellos en algunas regiones, principalmente en áreas rurales, se ha creado la necesidad de profundizar en el campo de nuevos materiales alternativos en el campo de la construcción. Partiendo de ello se han realizado investigaciones en el campo de fibras naturales, en donde el bambú y específicamente la GAK, ha sido objeto de dicho estudio.

La guadua presenta ventajas y competencias en términos de resistencia con otros materiales y fibras naturales. Las ventajas estructurales bajo la óptica de material en ingeniería, es estudiada en términos de módulo de elasticidad ( $E$ ) y su densidad ( $\rho$ ). En este sentido la Universidad de Cambridge desarrolló un método para selección de materiales ingenieriles que relaciona a  $E$ , contra  $\rho$ , el cual es mostrado en la Figura 3, aunque es importante validar su aplicabilidad (Wegst, U.G.K; Shercliff, 1993).

De igual manera, de la Figura 3, la línea divisoria representa la ecuación  $C = E^{1/2}/\rho$ , aplicada a las propiedades del bambú. Los materiales que presentan un mejor desempeño que el bambú son los que están ubicados por encima de la línea divisoria, mientras los que tienen un menor desempeño están situados debajo de dicha línea, como son el caso del acero, el concreto y el aluminio.

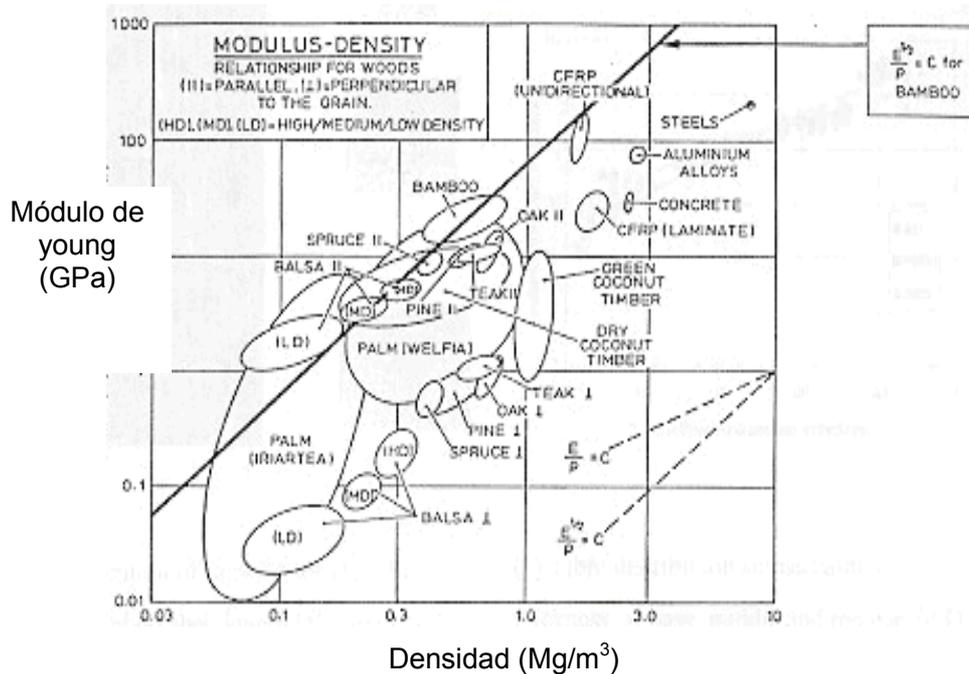


Figura 3. La guadua y otros materiales, en relación con E y  $\rho$  (Wegst, U.G.K Shercliff, 1993).

En la Tabla 4 se pueden observar algunas características mecánicas de la guadua, en comparación con otros materiales que la hacen competitiva, excepto contra el acero.

Tabla 4. Propiedades de la guadua comparada con otros materiales

Material	Gravedad Específica	Compresión (N/mm <sup>2</sup> )	Tensión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulos de Elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )
Acero	7.8	-	480	210
Concreto	2.4	25-55	-	10-17
Madera	0.4-0.8	50-100	20-110	8-13
Guadua	0.8-1.4	25-48	45-190	7-20

Para determinar las propiedades mecánicas de la guadua como las de cualquier bambú, se puede utilizar la teoría de elasticidad, pero es

importante tener en cuenta que se trata de un material compuesto. Así, para obtener parámetros como son el módulo de elasticidad (E) considerando las propiedades de las fibras y de la matriz con las fracciones volumétricas, se puede utilizar la ecuación 1, para el cálculo del módulo de elasticidad de la guadua como material compuesto  $E_c$ . En esta ecuación  $E_f$  y  $E_m$  son los módulos de elasticidad de la fibra y la matriz respectivamente, y  $V_f$  y  $V_m$ , siendo  $V_m = (1-V_f)$ , las fracciones volumétricas de la fibras y la matriz respectivamente. Sin embargo, para el material objeto de nuestro estudio, conocer el módulo de elasticidad de la matriz resulta objeto de otra investigación dado los niveles de dificultad.

$$E_c = E_f V_F + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

### 2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA GUADUA

Las propiedades físicas de la guadua más importantes a considerar por su relación con las características del material, las propiedades mecánicas y su incidencia en el comportamiento estructural son: la densidad y el contenido de humedad, para lo cual se ha encontrado una variación de las propiedades mecánicas en función del contenido de humedad y la gravedad específica cuando los elementos son sometidos a diferentes esfuerzos.

La densidad de la guadua es determinada por la norma S358.2 dada por ASAE (1990) o por las normas técnicas ISO-TC 165, dadas por el INBAR (1999).

Según Hidalgo (2003), la densidad en los bambúes varía entre 0,5 y 0.9 gr/cm<sup>3</sup>, dependiendo del tipo de especie y del lugar donde se haya tomado la muestra. Para la GAK, González et al. (1992), reportan un valor entre 0,57 y 0,60 gr/cm<sup>3</sup> para guadua proveniente de Santafé de Antioquia y asimismo Osorio et al. (2005) encontraron valores entre 0,6 y 0,7 gr/cm<sup>3</sup> para guadua proveniente del suroeste Antioqueño.

Otro parámetro físico importante es la humedad, ya que incide en las propiedades mecánicas. La humedad corresponde al peso del agua contenida en la pared celular de la sección del culmo, y se expresa en porcentaje como la relación del peso húmedo y el peso anhidro o seco,

determinada por la norma S358.2 dada por ASAE (1990) o por las normas técnicas ISO-TC 165 dadas por el INBAR (1999), de acuerdo a la ecuación 2:

$$H (\%) = \frac{(p - p_o)}{p_o} \quad (2)$$

H (%): Porcentaje de humedad en base seca.

P: Peso inicial de la muestra, en gr.

P<sub>o</sub>: Peso final de la muestra, en gr.

El contenido de humedad varía para cada especie de acuerdo con las condiciones climáticas e incluso para cada sección a lo largo del culmo, de ahí la importancia de tomar muestras y hacer pruebas cada vez que se requiere conocer la resistencia en los elementos a utilizar.

González et al., (2003), encontraron que en elementos sometidos a flexión en rangos entre el 7 y el 12% de contenidos de humedad en base seca la carga del elemento medida sobre la misma sección permanece constante, y a partir del 13,5% de humedad la resistencia aumenta notoriamente como se muestra en la Figura 4.

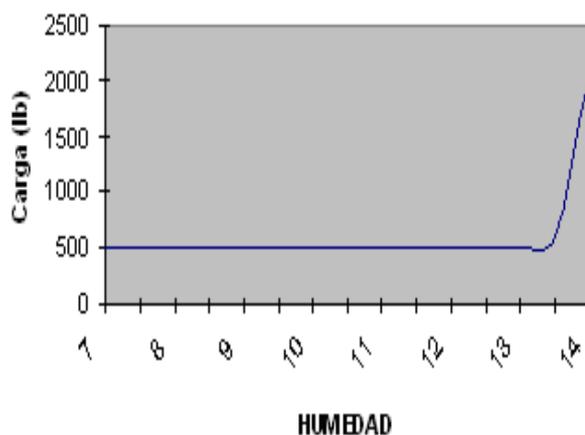


Figura 4. Humedad Vs. Carga  
(González et al 2003)

En la práctica este aspecto es importante, dado que en el momento de utilizar este material como elemento estructural, el contenido de humedad de estos tiende a equilibrarse de acuerdo a las condiciones ambientales de las zonas, obteniendo finalmente humedades por debajo del 13% en base seca. Lo que quiere decir que para tener un mejor y acertado conocimiento de la resistencia real de los elementos de guadua se deben realizar ensayos por debajo del 13% de humedad.

Osorio et al., (2005), determinaron una ecuación que correlaciona altamente la densidad de la guadua con el contenido de humedad. El análisis de varianza mostró un efecto significativo del contenido de humedad tal como se ilustra en la Figura 5 y el ajuste obtenido fue el siguiente con un coeficiente de correlación de 0,94, donde H es el contenido de humedad de Guadua expresado en porcentaje de base seca:

$$Den \left( \frac{g}{cm^3} \right) = 3,0771 + 0,33267 * H(\%b.s) \quad (3)$$

Esta ecuación es válida para humedades comprendidas en el rango de  $5,8\% \leq H (\%b.s) \leq 25,5\%$ , la cual se considera importante dado que solamente conociendo el contenido de humedad del material se puede determinar la densidad del mismo sin necesidad de realizar pruebas de laboratorio adicionales

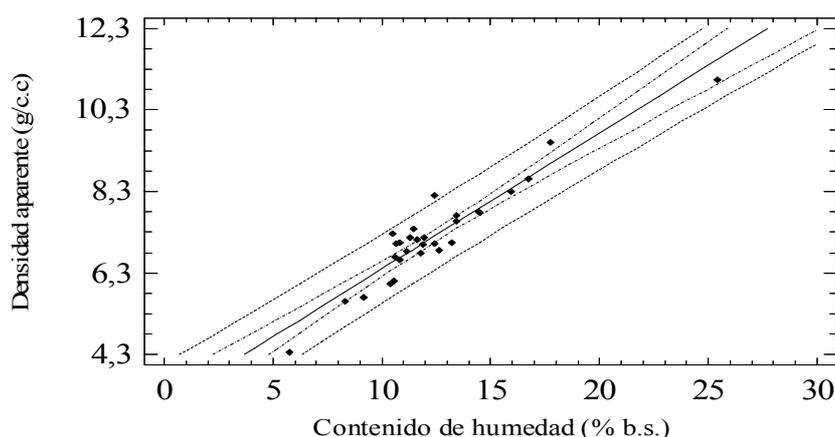


Figura 5. Regresión simple densidad contenido de humedad (Osorio et,al 2005)

Tradicionalmente, la determinación de las propiedades mecánicas de la guadua se ha regido por normas como la ASTM, ICONTEC y COPANT para maderas, las cuales han sido de difícil utilización dada las diferencias anatómicas.

A partir de 1999, se han implementado normas para la determinación de las propiedades mecánicas del bambú en el elemento, es decir en su estado y geometría natural y de material o en probetas; basadas en las normas técnicas ISO-TC 165 dadas por el INBAR "STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO" (1999), y por la ASTM 143-94.

### **Determinación de la resistencia a nivel de elementos:**

Se debe entender por elementos la guadua en su forma geométrica original. Se han encontrado diferentes valores de resistencia y de módulos de elasticidad según la procedencia de los elementos y su localización a lo largo del culmo. Dado lo anterior, es necesario entonces reportar la procedencia de la guadua y localización en el culmo del elemento ensayado.

- **Resistencia a flexión**

De acuerdo al INBAR (1999), los esfuerzos últimos de elementos sometidos a flexión estática, y el modulo de elasticidad pueden ser determinados a partir de las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

$$\sigma_{últ} = \frac{F * L * (D / 2)}{6 * I} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_{últ}$ : Resistencia ultima, en N/mm<sup>2</sup>

F: Carga máxima aplicada, en N.

L: La luz de la viga, en mm.

D: El diámetro externo del elemento, en mm.

I: El momento de inercia del elemento dado en mm<sup>4</sup>.

$$E = \frac{23 * F * L^3}{1296 * \delta * I} \quad (5)$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad, en  $N/mm^2$

$F, L, I$ : Son los parámetros que están denotados en la ecuación 3.

$\delta$ : La deflexión máxima obtenida del diagrama de esfuerzo deformación, mm.

La resistencia a flexión de la GAK, es influenciada por sus características geométricas, por el contenido de humedad y por la densidad aparente.

Osorio et al. (2005), sometieron elementos de guadua con contenidos de humedad del 10 y del 12% en base seca e igual sección, y longitudes de 2,5 y 3,0 m a flexión pura, encontrando que no hay incidencia de las variables longitud y contenido de humedad en la carga en el límite de proporcionalidad (CPLP), pero si hay relación del diámetro promedio externo de la sección transversal con el CPLP, tal como se observa en la Figura 6.

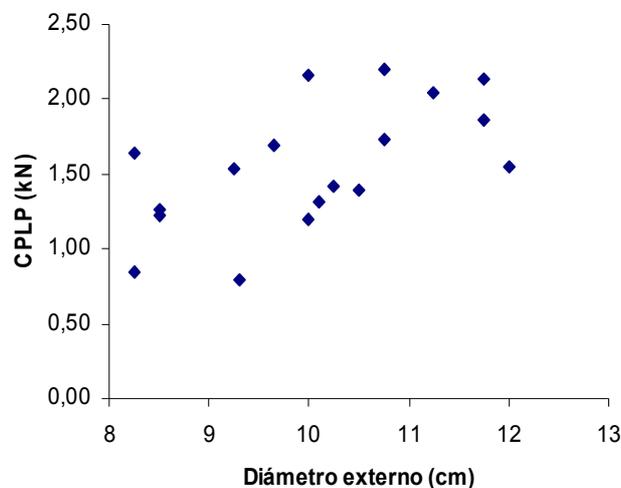


Figura 6. Relación entre el diámetro externo y carga en el límite proporcional (Osorio et,al, 2005).

La Tabla 5, presenta una recopilación de valores de resistencia de la GAK a flexión de diferentes zonas de Colombia. La variabilidad en los datos posiblemente se debe a las características intrínsecas del material

vegetal, como son estado de madurez y el lugar de donde se tomaron las muestras, es decir si de la cepa o basa del culmo.

Tabla 5. Resistencia de elementos sometidos a flexión.

Investigador	Lugar	Especie	$\sigma_{ult}$ (MPa)
Mejia (1985)	Eje Cafetero (Colombia)	Guadua angustifolia kunth	37,24
Díaz y González (1992)	Santafé de Antioquia (Colombia)	Guadua angustifolia kunth	36,36
González, Osorio y García (2002)	Santafé de Antioquia (Colombia)	Guadua angustifolia kunth	34,06
López y Cheatle (2002)	Eje Cafetero (Colombia)	Guadua angustifolia kunth	37,5
Janssen (2002).	-----	Guadua angustifolia kunth	48,2
Osorio, Ciro y Velez (2005)	Suroeste Antioqueño (Colombia)	Guadua angustifolia kunth	34,35
Castrillón, Malaver (2004)	-----	Guadua angustifolia kunth	45,0

### • Resistencia a compresión

Los ensayos a compresión son regidos por las normas técnicas ISO-TC 165 dadas por el INBAR. Carga en el límite proporcional  $P_{lp}$ , la resistencia última ( $P_{ult}$ ) y el módulo de elasticidad (MOE), se determinan gráficamente de las curvas obtenidas de carga contra deformación, además, la resistencia máxima o última es calculada a partir de la ecuación 5.

$$\sigma_{ult} (N / mm^2) = \frac{F_{ult}}{A} \quad (6)$$

Donde  $F_{ult}$  es la carga última en (N) y A, es el área en ( $mm^2$ ).

Las probetas a utilizar en los ensayos a compresión de acuerdo al INBAR especifican una altura entre 1 y 2 veces el diámetro con el fin de evitar efectos secundarios como el pandeo.

La Tabla 6, presenta una recopilación de valores de resistencia de la GAK a compresión de diferentes zonas de Colombia. Al igual que los ensayos a flexión, las diferencias en los resultados se deben a las características propias de las probetas obtenidas, del lugar de toma de la muestra y de la edad del culmo.

Tabla 6. Resistencia de elementos sometidos a compresión.

<b>Investigador</b>	<b>Lugar</b>	<b>Especie</b>	<b><math>\sigma_{ult}</math> (MPa)</b>
Díaz y González (1992)	Santafé de Antioquia (Colombia)	Guadua angustifolia	29,2
López y Cheatle (2002)	Eje Cafetero (Colombia)	Guadua angustifolia	28,0
Janssen (2002).	-----	Guadua angustifolia	36,0
Osorio, Ciro y Vélez (2005)	Suroeste Antioqueño (Colombia)	Guadua angustifolia	28,15
Castrillón, Malaver (2004)	-----	Guadua angustifolia	48,00

Osorio et al. (2005), realizaron ensayos de compresión en elemento cortos de guadua con igual sección, encontrando que el diámetro externo del elemento y su espesor, son los factores geométricos que mayor relación presentan en esta propiedad (ver Figuras 7 y 8).

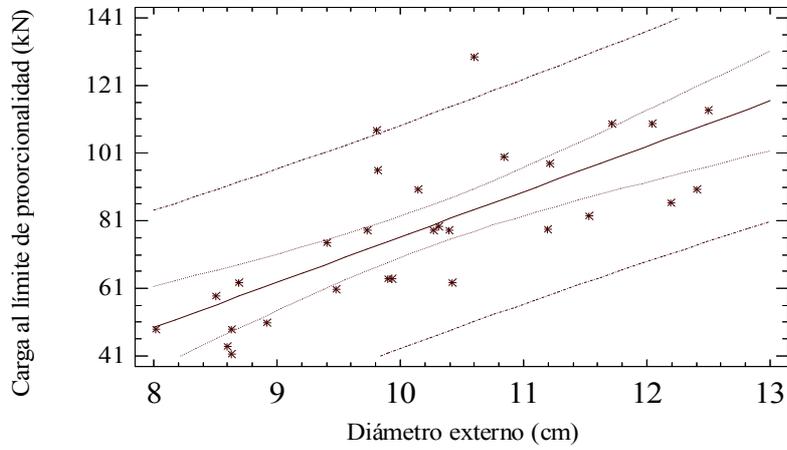


Figura 7. Regresión simple carga - diámetro externo (Osorio et al. 2005)

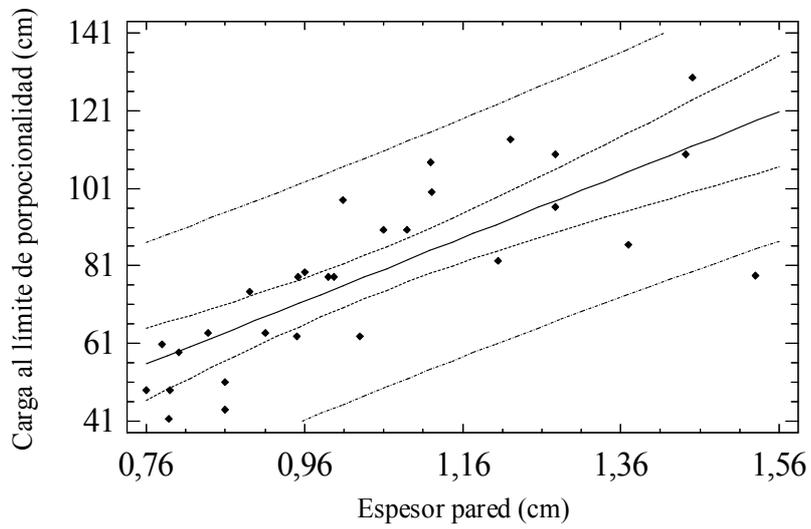


Figura 8. Regresión simple carga al límite de Proporcionalidad espesor pared (Osorio et al. 2005).

- **Resistencia a tensión**

La prueba de tensión es uno de los ensayos más comunes para determinar propiedades mecánicas, sin embargo, para la guadua no ha resultado tan común, ya que el principal problema a la hora de realizar ensayos resulta en la forma de sujetar la probeta en sus extremos que dan origen a errores en las lecturas en ciertas ocasiones, lo cual se ha solucionado mediante el uso de agarres neumáticos en las máquinas de ensayo. En consecuencia, con el fin de facilitar el agarre de las probetas, el INBAR sugiere utilizar probetas como se muestra en la Figura 9.

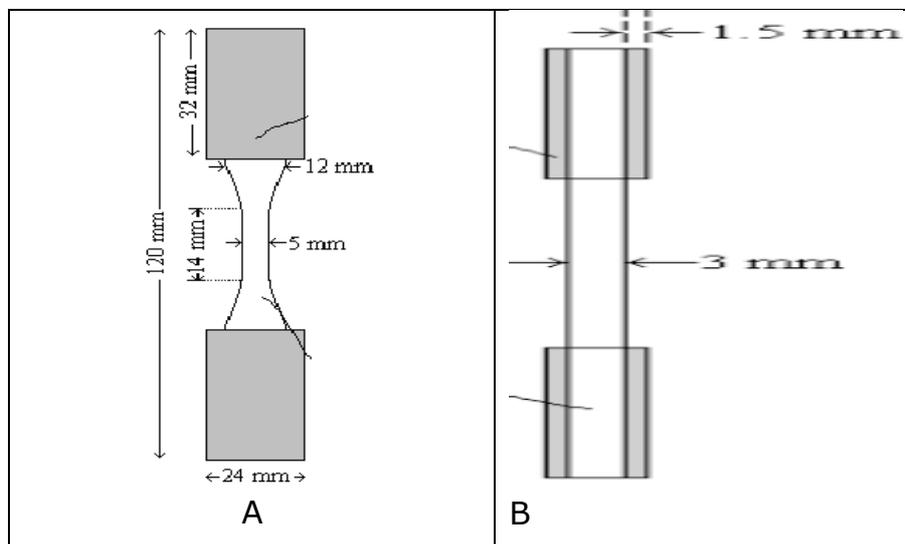


Figura 9. Probetas de guaduas a tensión (INBAR, 1999).  
A. Vista de frente. B. Vista lateral

El esfuerzo Máximo (MOR) y el Módulo de Elasticidad (MOE) se pueden obtener a partir de las siguientes ecuaciones:

$$MOR = P_{Max} / A (N / mm^2) \quad (7)$$

$$MOE = P_{pl} L / A \delta_{pl} (N / mm^2) \quad (8)$$

En donde  $P_{Max}$  es la carga máxima (N) y A es el área (mm<sup>2</sup>). El área es la medida de la sección transversal en la contracción, con un ancho fijo de 5 mm y el espesor de la pared del elemento, además, Ppl es la carga en el límite proporcional (N), L es la longitud de la parte estrecha (mm) y  $\delta_{pl}$  es la deformación en el límite proporcional (mm).

Ciro et al. (2005), realizaron una investigación tendiente a analizar la influencia que existe entre algunos parámetros geométricos con la resistencia última o máxima en los elementos sometidos a tensión. En donde los resultados mostraron que el factor espesor de la pared es el que mayor incidencia presenta en la resistencia. A su vez la Tabla 7, da a conocer que el valor encontrado de resistencia (190,7 MPa) con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 7. Resistencia última para elementos sometidos a tensión paralela

PARÁMETRO	Promedio (MPa)	Intervalos de Confianza al 95% (MPa)		Coeficiente de variación (%)
		Límite inferior	Límite Superior	
Esfuerzo último ( $\sigma_{últ}$ )	190,7	152,3	229,10	34

En la Tabla 8, se presentan algunos resultados de elementos de guadua y otras especies de bambú sometidos a tensión. Al igual que en los demás resultados, la variación se debe a las características intrínsecas del material.

Tabla 8. Resistencia de elementos sometidos a Tensión

Investigador	Lugar	Especie	$\sigma_{ult}$ (MPa)
Lee Teang Shul (1990)	Indonesia	Bambusa blumeana	180
Martínez (1992)	-----	Guadua angustifolia	34,6
Ahmad (2000)	-----	Bambu Calcuta	156,14
López y Cheatle (2002)	Eje Cafetero	Guadua	53,5

	(Colombia)	angustifolia	
Janssen (2002).	Colombia	Guadua angustifolia	148,4
Osorio, Ciro y Vélez (2004)	Suroeste Antioqueño (Colombia)	Guadua angustifolia	190,7
Castrillón, Malaver (2004)	Colombia	Guadua angustifolia	91,87

## Determinación de resistencia en el material

La determinación de la resistencia en el material, se considera de suma importancia para conocer las características intrínsecas al comportamiento del mismo, además estos resultados son considerados de gran utilidad al momento de diseño de equipos y herramientas para el procesamiento o transformación de dicho material. A continuación, se presentan las metodologías usadas para la determinación de los valores de resistencia así como sus respectivos resultados

- **Resistencia a Flexión**

Ahmad (2000), ajustó las normas ASTM 143-94 para pequeñas probetas, y propuso las siguientes ecuaciones para obtener la resistencia en el límite proporcional (SPL), la resistencia máxima (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE):

$$SPL = M_{pl} / Z \left( N / mm^2 \right) \quad (9)$$

$$MOR = M_{Max} / Z \left( N / mm^2 \right) \quad (10)$$

$$MOE = P_{pl} L^3 / 48 \Delta_{pl} I \left( N / mm^2 \right) \quad (11)$$

En donde  $M_{pl}$  es el momento flector en el límite proporcional (N-mm),  $M_{Max}$  es el momento flector en la carga máxima (N-mm),  $P_{pl}$  es la carga en el límite proporcional (N),  $L$  es la luz de la probeta (mm),  $\Delta_{pl}$  es la

deflexión (mm),  $I$  es el momento de inercia ( $\text{mm}^4$ ) y  $Z$  es módulo de la sección ( $\text{mm}^3$ ).

Debido a la anisotropía del bambú, Ahmad (2000) propone realizar ensayos a flexión tanto en el sentido radial como tangencial, con el fin de tener una buena aproximación al comportamiento del material (Ver Figura 10).

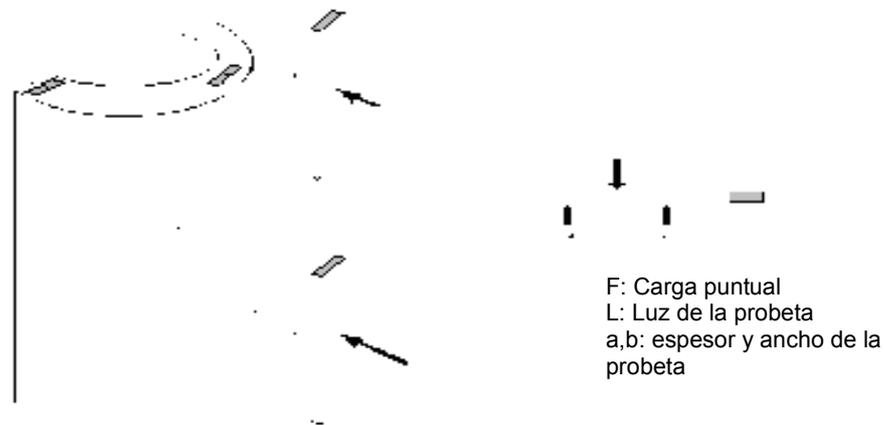


Figura 10. Probeta para realizar ensayos a flexión con cargas radiales y tangenciales sobre el material (Ahmad, 2000).

Ahmad (2000), también realizó ensayos sobre el bambú Calcuta, con presencia y ausencia de entrenudos, en los cuales tuvo diferencias significativas en los elementos fallados a flexión como se dan a conocer en la resistencia en el límite proporcional (SPL), y el módulo de elasticidad (MOE), en probetas con nudo y sin nudo:

$$\begin{aligned} \text{MOE}_i &= 10428,1 \text{ N/mm}^2 \\ \text{MOE}_n &= 9691,38 \text{ N/mm}^2 \\ \text{SPL}_i &= 91,2 \text{ N/mm}^2 \\ \text{SPL}_n &= 101,0 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Donde: (i) internudo y (n) nudo del elemento.

- **Resistencia a tensión**

Para determinar los esfuerzos a tensión se emplea el mismo procedimiento utilizado para determinar las propiedades mecánicas en los elementos.

Zen, Li, Zho (1992) citado por Hidalgo (2003), realizó pruebas a tensión en bambúes, analizando la influencia del internudo sobre la resistencia final del elemento. En la Tabla 9, se observa que la resistencia de las probetas sin nudos, es decir en el internudo puede llegar a ser aproximadamente un 19,2% más bajas que aquellas que presentan nudos.

Tabla 9. Resistencia a tensión del bambú con la presencia o ausencia de nudos.

<b>Propiedades</b>	<b>Sin Nudo (Mpa)</b>	<b>Con nudo (Mpa)</b>	<b>% de variación</b>
Tensión longitudinal	263.4	212.8	-19.2

Fuente: Hidalgo (2003)

Ahmad (2000), realizó ensayos sobre el Bambú Calcuta, tomando probetas a tensión con presencia y ausencia de entrenudos, en los cuales tuvo diferencias significativas, como se da a conocer a continuación:

$$SPLi = 156.14 \text{ N/mm}^2$$

$$SPLn = 185.3 \text{ N/mm}^2$$

$$MOEi = 16778.7 \text{ N/mm}^2$$

$$MOEn = 12722.8 \text{ N/mm}^2$$

## **2.4 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS Y DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL CULMO DEL BAMBÚ**

Las propiedades de los culmos de bambú están determinadas por su estructura anatómica, ya que ella define las propiedades mecánicas y por tanto el uso final del material (Líese, 1998).

La estructura interna de los bambúes se encuentra conformada por una matriz de parénquima, y haces vasculares, los cuales se componen a su vez de tejido conductivo, células de parénquima y de fibras (ver Figura 12).

La sección transversal de la pared del culmo de los bambúes esta compuestos por un 52% de tejido de parénquima, un 40% de fibras y un 8% de tejido conductivo (Liese, 1998). En la GAK Londoño et al. (2002), encontraron que esta se encuentra compuesta por un 51% de tejido de parénquima, un 40% de fibras y un 9% de tejido conductivo.

La apariencia de la sección transversal del bambú esta determinada por la forma, el tamaño, el número y la concentración de haces vasculares que varían desde la periferia hacia la parte interna, y desde la base del culmo hacia el ápice del mismo. Cerca de la periferia, los haces vasculares son pequeños, numerosos y concentrados, mientras que en la parte media del culmo son más grandes y con una distribución más amplia (Grosser y Liese, 1971), (ver Figura 11).

El tejido conductivo del culmo según Londoño (2002), esta compuesto por células de esclerénquima, vasos (metaxilema, floema, protoxilema) y por tubos criboso con células acompañante (ver Figura 1)

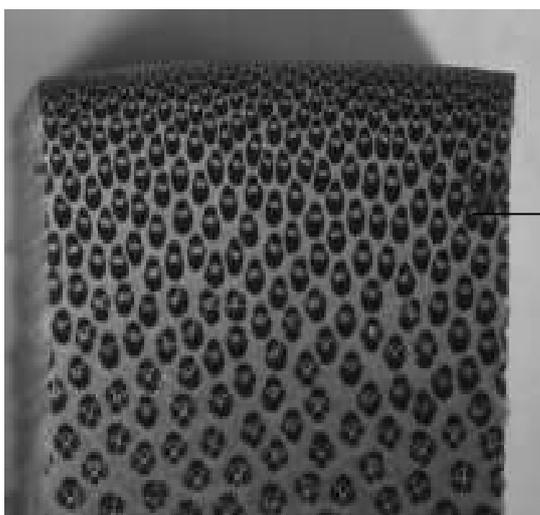


Figura 11. Distribución de los haces vasculares en la sección transversal del culmo del bambú (Liese, 1998).

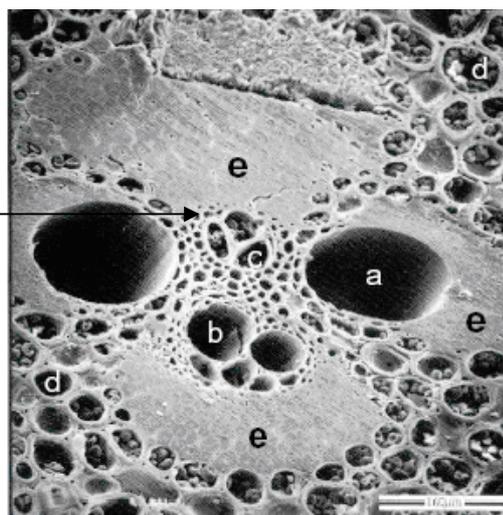


Figura 12. As vascular con sus partes. A) vasos, b) floema, c) protoxilema, d) células de parénquima, e) fibras. (Liese, 1998)

A través de la pared del culmo en otros bambúes, el porcentaje de fibra decrece de la zona externa a la interna, mientras que el porcentaje de parénquima es mayor en la zona interna que en la externa. El

porcentaje de tejido conductivo crece de la zona externa a la interna (Liese, 1998).

Londoño et al. (2002), encontraron que en un corte transversal del culmo de la GAK, se diferencian cuatro zonas, cuyas diferencias se deben a la forma y tamaño de los haces vasculares en cada una de ellas: a) periferia, que corresponde al 4,5% del espesor de la pared del culmo; b) transición, que corresponde al 10,7%; c) media, que corresponde al 73,9% y d) interna, que corresponde al 10,8% del espesor de la pared del culmo. (Ver Figura 13).

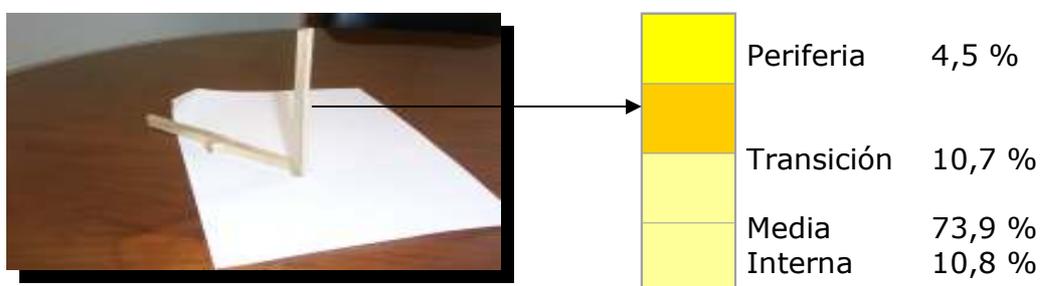


Figura 13. Distribución de capas en el espesor del elemento

Las células de parénquima recubren el tejido conductivo y las células de fibra. Las células de parénquima son más pequeñas en la zona externa de la pared del culmo y aumentan su tamaño hacia la zona interna. La longitud de estas varían entre 20 y 80  $\mu\text{m}$  y su espesor entre 25 y 40  $\mu\text{m}$ , y se encuentran unidas por conectores especiales que le dan la apariencia de un material sólido (Grosser y Liese, 1971).

Bajo el nombre genérico de fibras se agrupa un conjunto de materiales que poseen una longitud ( $L$ ) mucho mayor que su diámetro ( $d$ ), es decir, poseen un valor elevado de la relación  $L/d$ , que es denominada relación de aspecto (Schaffer, 2000). Las fibras naturales de origen vegetal como el cáñamo y el yute dicha relación oscila entre 1000 y 3000. Las fibras sintéticas, gracias a su proceso de fabricación continuo, pueden conseguir cualquier relación de  $L/d$  (Saiza, 1998).

En la Tabla 10, se dan a conocer algunas propiedades de fibras naturales investigadas por diferentes autores, entre las que se encuentra el bambú.

Tabla 10. Propiedades de algunas fibras naturales

<b>Especificaciones</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Bambú</b>	<b>Yute</b>	<b>Coco</b>	<b>Bagazo</b>
Absorción de humedad (%)	400	145	214,1	120	78,5
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1200-1500	1158	301	-	1250
Resistencia a la tracción (MPa)	500	575	-	118	196,4
Modulo de elasticidad MPa *10 <sup>3</sup>	10-40	28,8	-	-	16,9
Elongación (%)	-	3,2	3,7-6,5	44,7	-
Referencias	Ghavami (1981)	Ghavami (1981)	Agopyan (1988)	Guimaraes (1984)	Sera (1990)

En la Figura 14, se observa que las fibras de bambú poseen una mayor resistencia a tensión, comparadas con otras fibras naturales como son el coco y el bagazo, sin embargo las propiedades mecánicas de las células de fibra para cada especie depende de su composición y arquitectura según Bruce. M (2003).

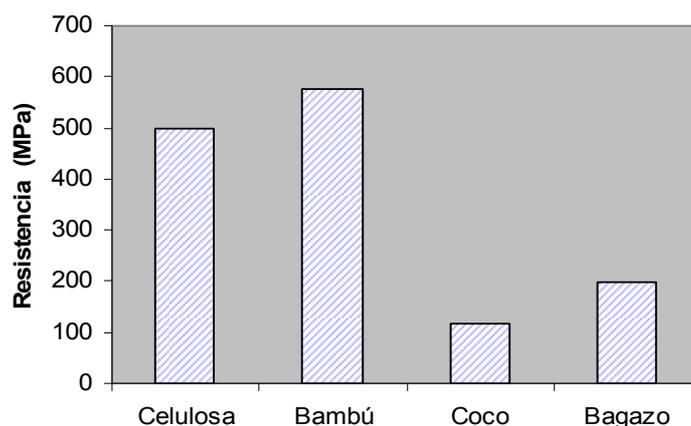


Figura 14. Resistencia a la tensión de

### algunas fibras naturales

Una de las características de las fibras de los bambúes, es que a lo largo del culmo su espesor y longitud decrecen de la parte baja a la parte alta. Las fibras de los bambúes son caracterizadas por presentar una forma delgada y rematar en una forma ahusada (tenedor). Liese (1998), reporta que las fibras de la *Guadua angustifolia* presentan una longitud promedio de 1,60 mm y un espesor de 11  $\mu\text{m}$ .

La Figura 15, muestra una micrografía de la forma de la sección transversal en una fibra de GAK. Esta forma fue típica para todas las fibras analizadas por Moreno et al. (2004), siendo irregular con crestas y depresiones, que pueden alcanzar desde 0.1mm hasta 0.9 mm de altura.

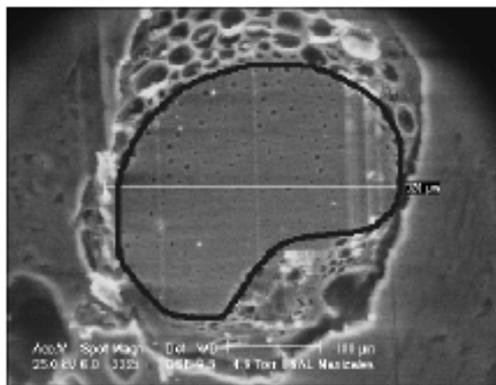


Figura 15. Micrografía de la sección transversal de una fibra de GAK a 222x (Moreno et al. 2004).

La Figura 16 muestra la estructura de las células de fibra para la madera, en el cual se diferencia geometrías axiales, transversales y helicoidales entre otras, que dependen del tipo de especie (Anne et al, 1998).

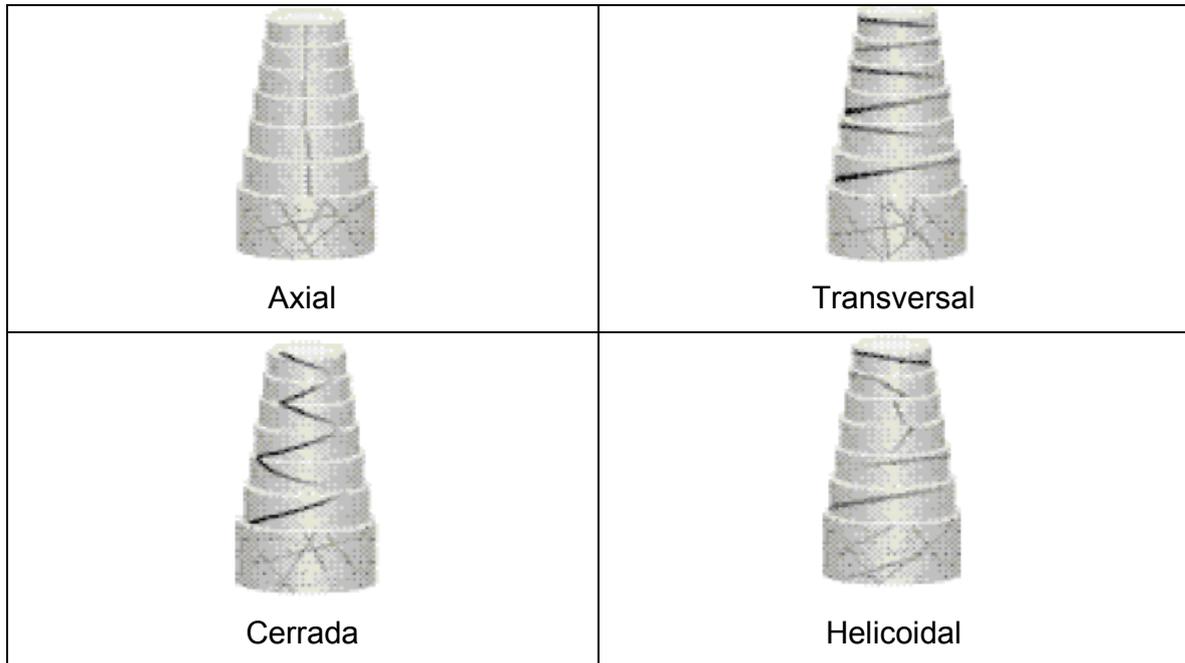


Figura 16. Estructura básica de las células de fibra de maderas (Anne et al, 1998)

La estructura interna de las fibras del bambú es única, y según los investigadores Tono y Ono (1962), así como Parameswaran y Liese (1976), entre otros, poseen paredes interiores alternadas en capas gruesas y delgadas con diferente orientación. Esta estructura, que no existe en fibras de madera común, se le denomina estructura polilaminar, y aparece especialmente en las fibras ubicadas en la periferia del culmo. En general, puede decirse que estas paredes alternadas conducen a que el culmo tenga una altísima resistencia (Liese, 1985) (ver Figura 17).

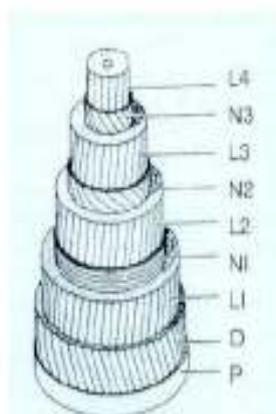


Figura 17. Modelo de una estructura polilaminar de la fibras del bambú. P: Pared primaria, O: Capa exterior de la pared secundaria (Parasmewaran y Liese 1976).

La estructura y composición de las paredes de las células de fibra, dependen de cada especie de manera particular, pero todas en ellas están compuestas por paredes primarias y secundarias como en cualquier tipo de madera. La estructura de las fibras están determinadas por estructuras de paredes helicoidales, en la cual la orientación de las fibras alternan entre capas sucesivas, donde las propiedades en el plano de las paredes son isotrópicas y en el interior son altamente anisótropicas (Bruce. M, 2003). Esta estructura de las células de fibras que se encuentra constituidas por paredes helicoidales, son compuestas por una serie de microfibrillas con ángulos diferentes en cada capa, que dependen de cada especie (Anne et al, 1998).

Diferentes resultados han sido reportados acerca del número de capas que componen las células de fibras en el bambú, encontrando un número máximo de 18 capas. El número de capas en las paredes de las células de fibras del bambú varían no solamente dependiendo la especie de bambú y sus edades, sino además del lugar de donde son extraídas. En bambú *Phyllostachys viridiglaucescens*, con culmos de un año, se encontraron tres capas en las células de las fibras, mientras que en culmos de doce años, se encontraron cerca de ocho capas (Murphy et al, 1992).

El conocimiento de las estructuras de las células de las fibras ayuda al entendimiento de las propiedades mecánicas de los materiales, y se convierte en parte fundamental para el diseño y producción de nuevos materiales. Cuando se modela un material vegetal, es importante conocer a nivel jerárquico que parte del elemento es importante y la que se quiere conocer, dada la compleja estructura que forman las células de fibras (Bruce M, 2003)

La Figura 18, da a conocer un modelo geométrico de una estructura helicoidal, conformado por cuatro capas de microfibrillas en diferente orientación, que parte de un centro de la célula completamente

cilíndrica, y que permite modelar el movimiento de la síntesis de proteínas en las paredes de las células (Anne, et al 1998).

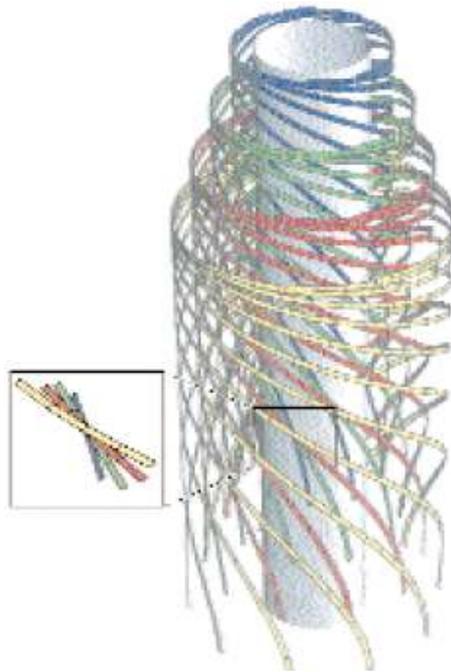


Figura 18. Modelo helicoidal de células de fibras  
(Anne et al, 1998)

Wang Zheng Guo Wenjing (2002), encontró una distribución de fibras en el culmo del bambú *Yunnanicus*, en donde se diferenciaron una serie de fibras largas y cortas, cuyos promedios en longitud son los reportados por Liese (1998).

Tanto Londoño et al. (2002) como Lése (1998), concuerdan en describir que a nivel anatómico las partes de la estructura de los bambúes que mayor influencia presentan en el comportamiento mecánico de los

mismos son el porcentaje de fibras, el porcentaje de los tejidos conductivos y el porcentaje de parénquima, sin llegar a describir el porque de dicha afirmación.

Abd Latif (1990), estudió utilizando la *Bambusa vulgaris* y determinó que el tamaño y el espesor de las células de fibras presenta una relación directa con el módulo de elasticidad y la resistencia en el límite de proporcionalidad, además que el espesor del lumen es inversamente proporcional a la resistencia última. Esta relación se da principalmente para los esfuerzos a compresión y a tensión.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

El material utilizado correspondió a culmos de *Guadua angustifolia kunth*, forma cebolla, con edades promedio de 5 años, provenientes del municipio de Cocorná, Antioquia, a 1300 msnm y con una temperatura promedio de 23 °C.

#### 3.2 METODOLOGÍA

Se utilizó la parte inferior correspondiente a la zona de la cepa (entrenudos de 0 al 16) y de la basa (entrenudos de 16 al 30).

Los culmos o tallos dentro del rodal o bosque de guadua, fueron seleccionados al azar, con diámetros mayores a los 10 cm medidos a una altura de 1,20 m, estos fueron curados en la mata durante 22 días y secados naturalmente en un tiempo de 30 días, con el fin de garantizar porcentajes de humedad en el material menores al 20% en base seca, según Castaño et al (2004).

Una vez realizado el secado del material, este fue cortado en la sección de la cepa y de la basa, y se obtuvo posteriormente las probetas (ver Figura 19).

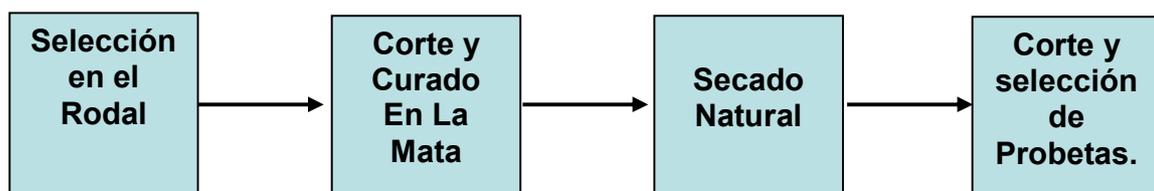


Figura 19. Flujo de preparación del material

Se seleccionaron probetas con nudo y sin nudo, en dos partes del culmo, en la cepa y la basa, con el fin de analizar la influencia de este en los ensayos mecánicos. Los sitios de donde se extrajeron las probetas no sobrepasaron dos entrenudos subsiguientes, con el fin de garantizar la homogeneidad del material utilizado (ver Figura 20).

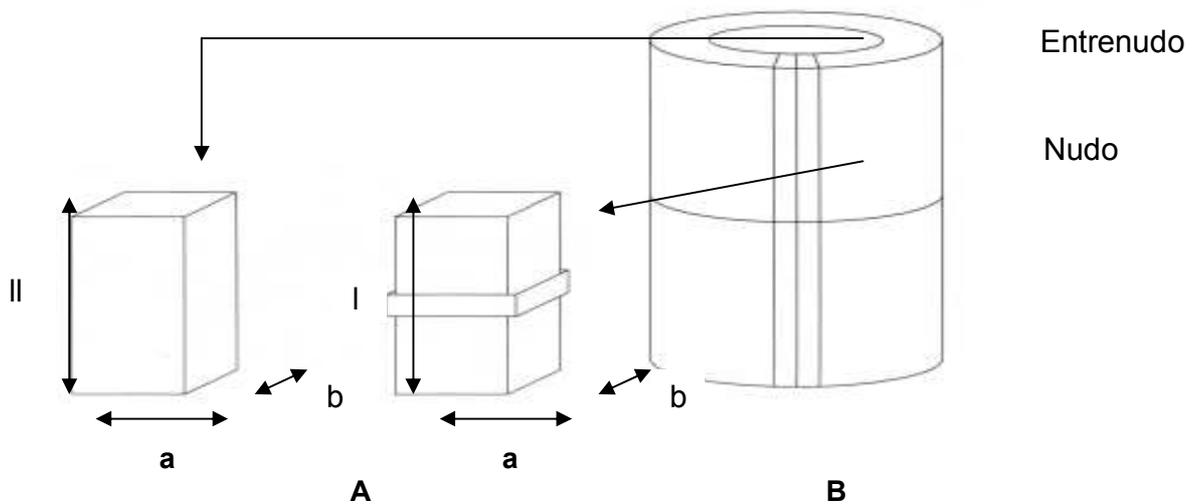


Figura 20. **A.** Probetas con nudo y sin nudo. **B.** Culmo de Guadua.

La sección transversal de la guadua se dividió en tres capas o zonas, debido a que en los análisis preliminares se observó que las dos primeras capas no presentan una alta variabilidad desde el punto de vista mecánico, aunque Londoño et al. (2002), reportan la presencia de cuatro capas o zonas en el espesor total: Periferia y transición que se denominó como zona externa y correspondió al 15 % del espesor total; la zona media con un 75 % del espesor total y la zona interior con un 10 % del espesor total (ver Figura 21).

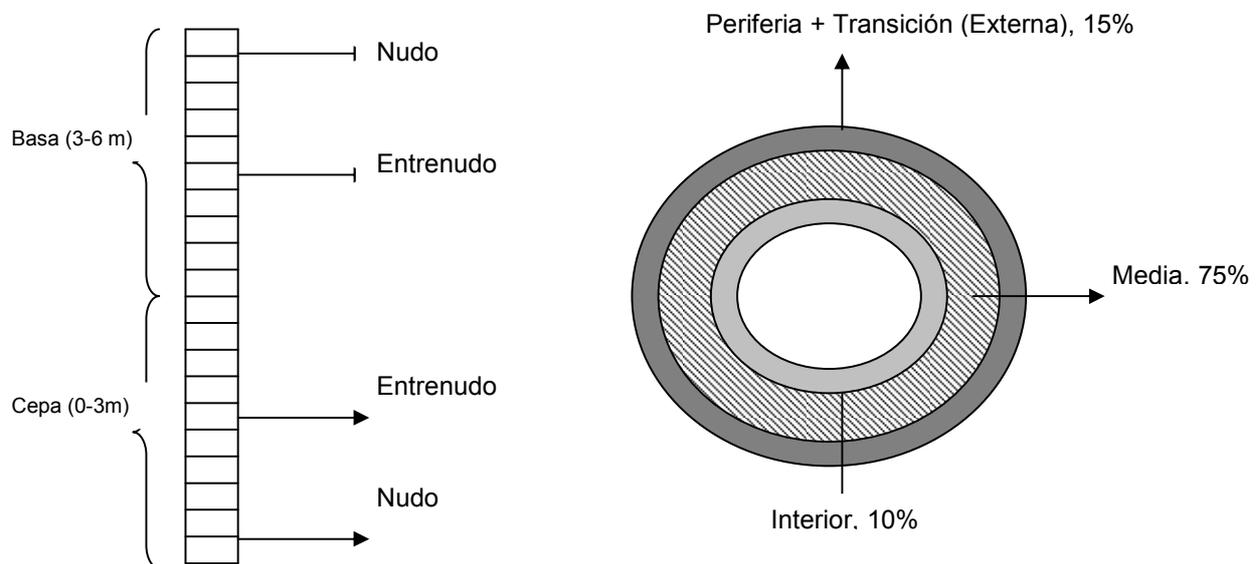


Figura 21. Lugares para la extracción de las probetas. A) Vista longitudinal B). Vista transversal de la pared del culmo.

Las probetas a tensión fueron dimensionadas de acuerdo a las especificaciones que se dieron a conocer en la Figura 9, en donde la única dimensión variable fue el espesor de la probeta que depende propiamente del material.

En cuanto a las probetas a flexión, aunque en el numeral 8.2 de la norma sugiere que se debe mantener un valor mínimo de 14 en la relación de la luz de la probeta ( $L$ ) y el espesor ( $a$ ), se utilizó relaciones cercanas a 9, ya que presentó los mejores resultados en los ensayos preliminares, representados en las curvas de esfuerzo deformación que se acercan mas a un comportamiento elástico. En la Tabla 11, se da a conocer las dimensiones de las probetas falladas a flexión.

Tabla 11. Dimensiones de las probetas falladas a flexión en (cm)

Zona	Luz ( $L$ )	Ancho ( $b$ )	Espesor ( $a$ )
Externa (Periferia y transición) e interna	2	0,5	Variable
Total y media	10	0,5	Variable

Las probetas utilizadas presentaron contenidos de humedad entre 10 y 13% en base seca, las cuales fueron secadas a 75 °C en atmósfera ambiente.

La caracterización de la estructura interna se realizó tanto para las probetas sometidas a flexión y tensión en cada una de las capas identificadas, en donde se determinó el área de parénquima, el área de fibra y de tejido conductivo en términos de porcentaje en relación con el espesor total del material, a través de la técnica de procesamiento de imágenes.

Utilizando el microscopio de barrido SEM y óptico, se analizó la estructura del material compuesto, en la unión parénquima, tejido conductivo y fibra dentro de la matriz.

Otro parámetro que se determinó fue la longitud y el espesor de las células de fibras. Para ello se extrajeron muestras de cada una de las capas en que se dividió la sección transversal por medio de maceración, y posteriormente fueron diluidas en ácido acético y peróxido de hidrógeno en una relación 1:1. Dichas muestras fueron teñidas en safranina y analizadas en el microscopio óptico.

La caracterización química de la guadua, consistió en conocer cuantitativamente los contenidos elementales en % de peso de silicio y carbono existentes en cada una de las tres capas analizadas. Estas propiedades químicas se obtuvieron a través de análisis de EDS, en el equipo de microscopio avanzado de barrido SEM.

En la caracterización física se determinó el contenido de humedad y la densidad del material, utilizando para ello las normas S358.2 dada por ASAE (1990) y la ISO-TC 165 dadas por el INBAR (1999).

Una vez conocida las propiedades físicas, obtenidas y controladas las variables de los contenidos de humedad, se determinaron las propiedades mecánicas del espesor total y de cada una de las tres capas en que se dividió del material

Las propiedades mecánicas a tensión, y a flexión radial (en el sentido al radio de la GAK) y tangencial con la ausencia y presencia de nudos, fueron determinadas de acuerdo a las normas ASTM 143-94 e ISO TC-165 del INBAR (1999).

En la Tabla 12, se muestran las variables obtenidas y el número de repeticiones realizadas en los ensayos mecánicos.

Tabla 12. Variables medidas en los ensayos mecánicos a flexión y tensión.

Ensayo	VARIABLES MEDIDAS EN (MPa)	Número de repeticiones
Flexión radial y tangencial	-Módulo de elasticidad (MOE). -Resistencia máxima -Esfuerzo en el límite proporcional	4
Tensión	-Módulo de elasticidad (MOE). -Resistencia máxima	4

La relación de Poisson para el espesor total como para cada capa analizada se obtuvo a partir de la ecuación 11, sometiendo el material a deformaciones bajo cargas axiales constantes como se muestra en la Figura 22

$$\nu = -\frac{E_x}{E_y} = \left| \frac{\text{Deformación unitaria lateral}}{\text{Deformación unitaria axial}} \right| \quad (11) \quad (12)$$

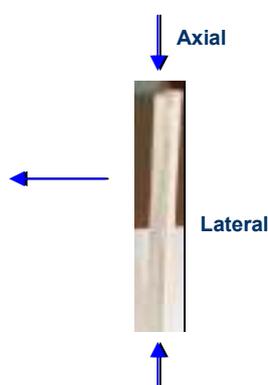


Figura 22. Probetas para encontrar la Relación de Poisson.

Para obtener la deformación axial y lateral, se utilizó la técnica de procesamiento de imágenes utilizando para ello la herramienta de Matlab versión 5.3.

Para determinar las posibles relaciones existentes entre la estructura interna del material y las propiedades mecánicas como son la resistencia

a tensión y a flexión así como la relación de Poisson, se utilizaron análisis de varianza para observar diferencias significativas de estas variables. A las variables con diferencia significativa se le realizó comparaciones múltiples con pruebas DUNCAN a un nivel de significancia del 5%.

Determinado el modelo estadístico, fue necesario validarlo de modo que pueda comprobarse si es adecuado para realizar el análisis. La validación del modelo debió cumplir con los siguientes supuestos (Montgomery, 1991):

- Los errores experimentales y por lo tanto las observaciones deben comportarse de acuerdo a una distribución normal. Para la validación de este supuesto se utilizó el histograma de frecuencias (las barras deben formar una campana).
- Los errores son independientes. Con la aleatorización en la toma y registro de los datos, se garantiza que los errores son totalmente independientes en todas las pruebas.
- Las varianzas de los tratamientos se suponen homogéneas. Para validar este supuesto la gráfica de los residuos vs valores predichos debe mostrar fluctuaciones aleatorias alrededor de un valor cero.

El incumplimiento de uno o más de estos supuestos puede afectar tanto el nivel de significancia, como la sensibilidad de las pruebas para detectar diferencias reales entre los tratamientos.

De acuerdo con Steel y Torrie (1984) en la mayoría de los ensayos *biológicos* estos requisitos se cumplen sólo en forma *aproximada*, por lo cual los procedimientos de pruebas de hipótesis y la estimación por intervalos de confianza no deben considerarse exactos sino aproximados.

Para determinar el tamaño muestral se hizo una prueba piloto con tres réplicas por tratamiento para las pruebas de Flexión radial y tangencial, como para las de tensión y Poisson, y cinco réplicas para las pruebas de caracterización de las fibras. Este tamaño se determinó por medio de

las curvas características de operación, que es una gráfica de la probabilidad de error tipo II contra el parámetro  $\phi$  que refleja la medida en la cual la hipótesis nula es falsa.

El valor de n fue tanteado para las dos pruebas, para n=4 y n=50 y se obtuvo respectivamente.

Tabla 13. Tamaño muestral.

<b>Prueba</b>	$\phi$	$\beta$	<b>poder</b>
Flexión radial y tangencial, tensión y Relación de Poisson	1,67	0,04	0,96
Caracterización de las fibras	1,76	0,05	0,95

Poder =  $1 - \beta$

Como el valor de la potencia deseada fue mayor al 95%, entonces las replicas correspondientes a esta potencia fueron las adecuadas para aplicarlas al experimento.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 ANÁLISIS QUÍMICO

Las Figuras 23 y 24, muestran de manera cuantitativa los niveles de silicio y de carbono en la corteza y la capa media. En la corteza se encontró un 16,5% de Si y un 43,4% de carbono, mientras que en la capa media un 2,3% de Si y un 44,9% de carbono en peso. Estos contenidos de Si son un indicativo de la resistencia del material a esfuerzos y se relaciona con el alto desgaste de cuchillas en los procesos de maquinados de la GAK.

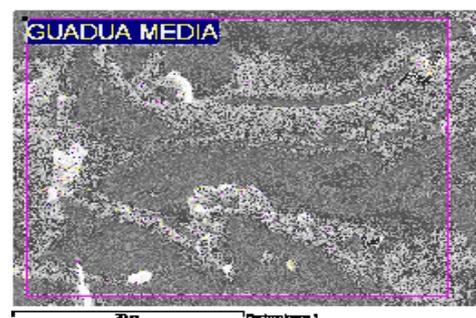
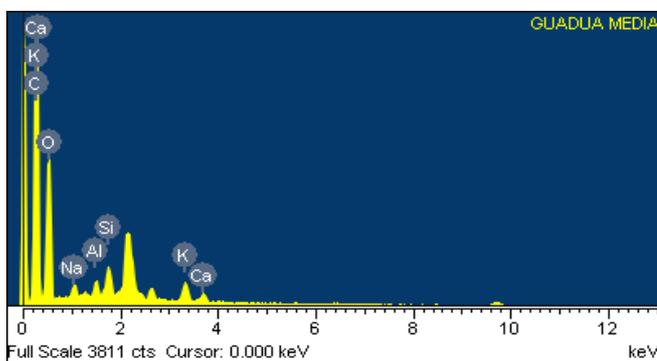
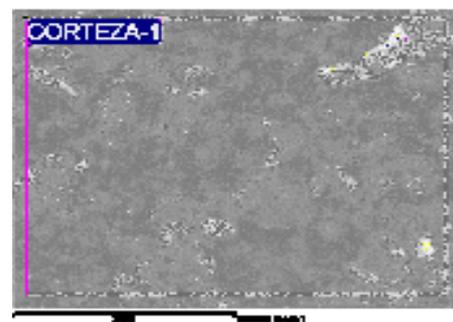
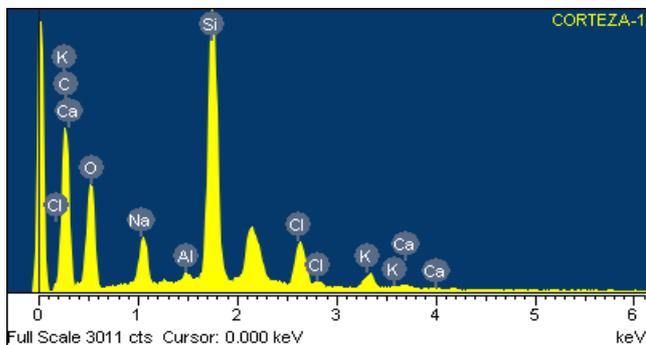


Figura 23. Composición química de la corteza y capa media de la GAK  
 En la capa interna, no se encontró silicio más si contenidos de carbono del 48,6%, aspecto que posiblemente se puede relacionar con la poca resistencia mecánica del material en esta capa debido a un mayor contenido de parénquima. No fue posible hacer comparación del análisis por zonas ya que no se encontraron antecedentes en la literatura.

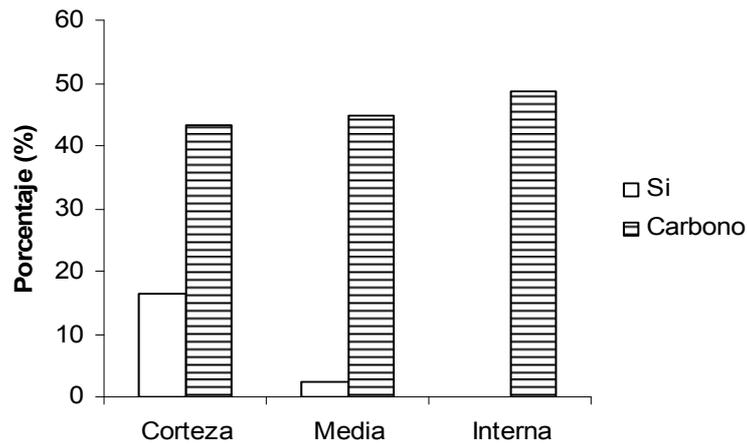


Figura 24. Composición química de la GAK

Los contenidos de carbono son indicativos de la presencia de carbohidratos en el material, celulosa y hemicelulosa, aunque no se evidenció detalladamente la composición de su estructura para la GAK, pero se conoce que en los bambúes según Li, Zeng Xiao (1995), los contenidos de celulosa se encuentran entre el 40 y 50%, la hemicelulosa entre el 20 y 35% y de lignina entre el 15 y 35%.

En términos generales, los resultados encontrados de contenidos de silicio y carbono en el material, se encuentran dentro de los rangos reportados por Castaño (2004) y por Wang Zheng (2002), que dan a conocer valores de Si entre el 0,5 y 4% para el espesor total, para otros tipos de bambúes.

## 4.2 ESTRUCTURA INTERNA

La Figura 25, muestra la estructura anatómica de la guadua en la cepa y en la basa del elemento, en donde se evidencian además las capas externas, medias e internas que conforman el espesor total. Al obtener probetas del material realizando un corte transversal, se encontró que el

espesor total de la cepa es mayor en promedio que el de la basa a lo largo del culmo o tallo.

La estructura interna de la GAK en cada una de las capas analizadas, se encuentra conformada por células de parénquima y haces vasculares, los cuales a su vez se componen de tejido conductor (Vasos conductores), de fibras y parénquima.

La unión entre fibras y el parénquima se da por la presencia de celulosas y hemicelulosas que son carbohidratos de alto peso molecular, además de lignina que es un complejo polimérico presente en el material.

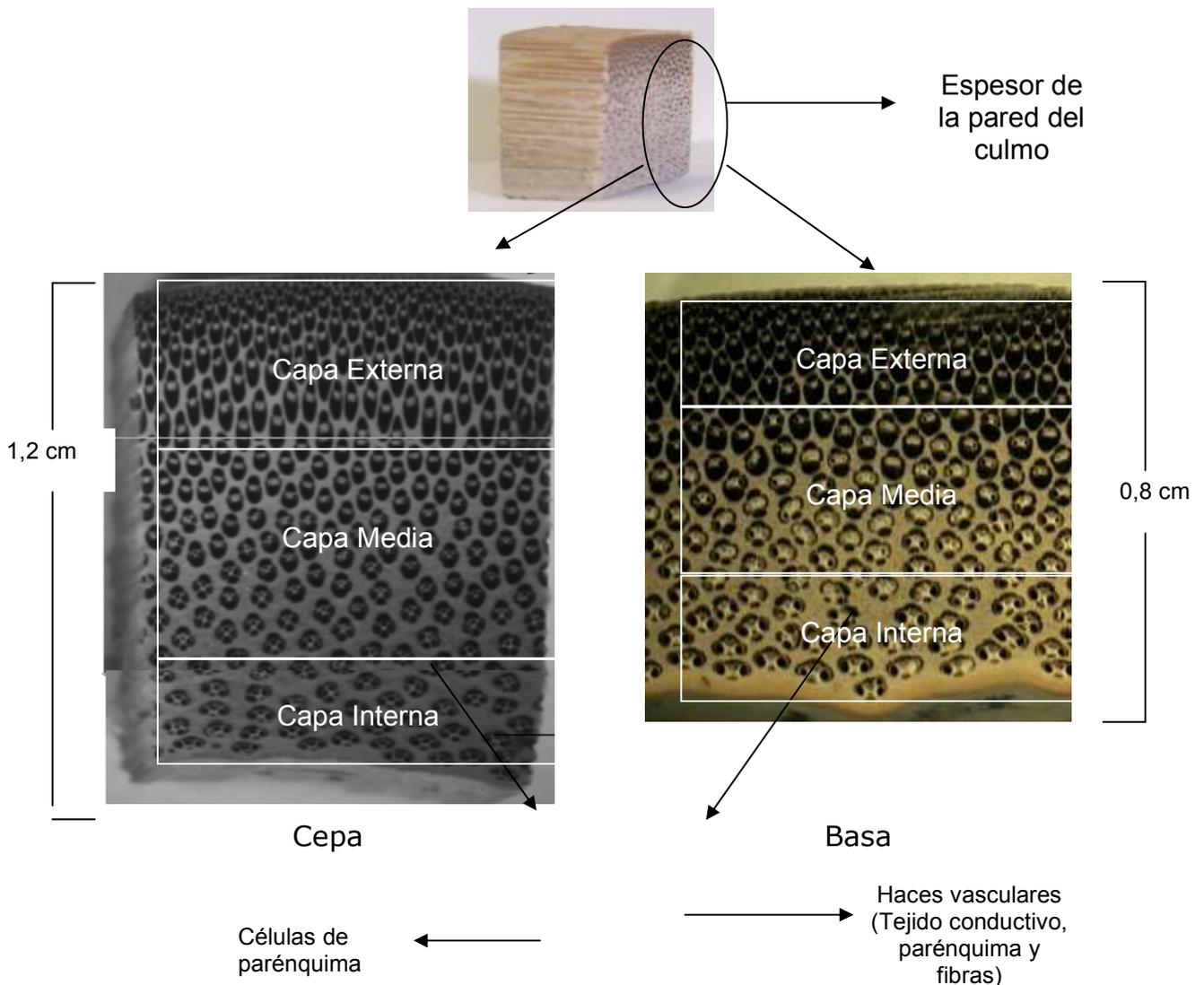




Figura 25. Estructura anatómica de la cepa y la basa

La Figura 26, muestra células largas y cortas de parénquima. Las células de parénquima presentan una forma rectangular de laminas de poco espesor, que se encuentran dispuestas entre sí y ubicadas aleatoriamente alrededor de los haces vasculares, del tejido conductivo y entre las fibras y las células de fibra.

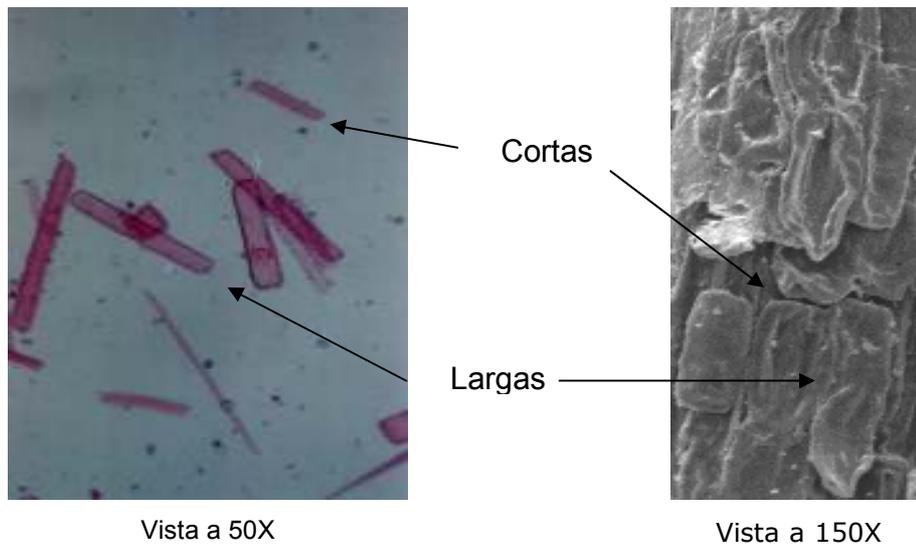


Figura 26. Células cortas y largas de parénquima

La Figura 27, muestra la distribución de células de parénquima en la cepa y la basa determinadas por análisis de imagen. Se encontró que el porcentaje de parénquima incrementa de la capa externa a la interna tanto en la cepa como en la basa, lo cual confirma la distribución de

estas células mostradas en la Figura 25. Esta distribución de células de parénquima coinciden con las reportadas por Liese (1998), en la pared del *Phyllostachys makinoi* y por Londoño (2002), en GAK forma macana.

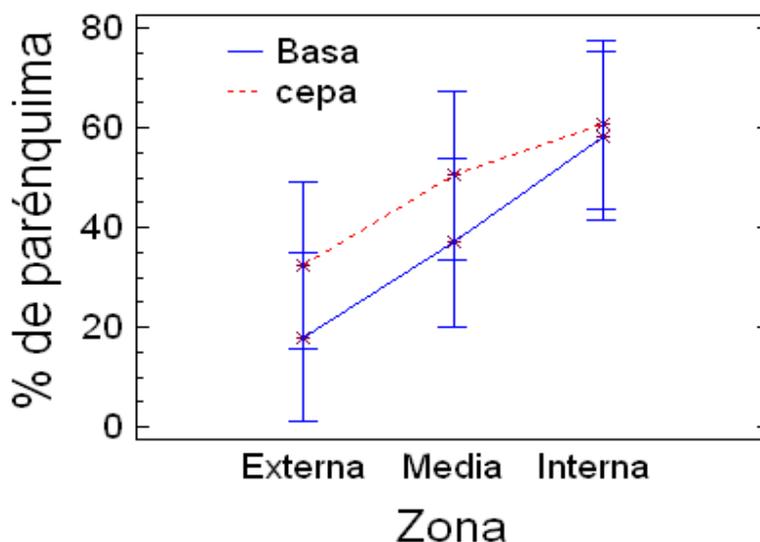


Figura 27. Distribución de células de parénquima con intervalos LSD

Al realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% se observó que los factores Zona (Externa, Media e Interna), y Partes (Cepa y Basa), resultaron significativos ( $P < 0,05$ ) (ver Tabla 1, Anexo A), lo que significa que el porcentaje de parénquima, es afectado por las zonas y las partes de donde se extrajeron las probetas de las probetas.

La Tabla 14 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. El porcentaje de parénquima varío según la zona y las partes. El porcentaje de parénquima en la zona externa es significativamente inferior y diferente a las demás zonas, mientras la cepa presenta un porcentaje de parénquima significativamente mayor que la basa.

Tabla 14. Intervalos múltiples de Duncan para porcentaje de parénquima.

<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	59,03	57,56	60,49	18	Interna
B	43,54	42,07	45,00	18	Media
C	24,87	23,40	26,33	18	Externa
<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	47,37	46,17	48,56	27	Cepa
B	37,58	36,39	38,78	27	Basa

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

La Figura 28, muestra la variación de la forma y tamaño de los haces vasculares a través del espesor total. Se observa una forma ovalada en la capa externa, ovalada irregular en la media, mientras que en la capa interna se aprecia una forma de trébol. Dado que la variación de la forma y tamaño de los haces vasculares son un indicativo del tipo de capa, corrobora que la separación de las capas metodológicamente fue apropiada, ya que no existen diferencias significativas para efectos de análisis del comportamiento mecánico, entre las dos primeras capas reportadas por Londoño (2002)

La forma ovalada, corresponde a la clasificación realizada por Grosser y Liese (1985) y Londoño (2002), para descripción anatómica e identificación de especies de bambú a las llamadas TIPO IIA. El tamaño de los haces vasculares aumenta de la capa externa a la interna, aspecto que coincide con lo reportado por Liese (1998).

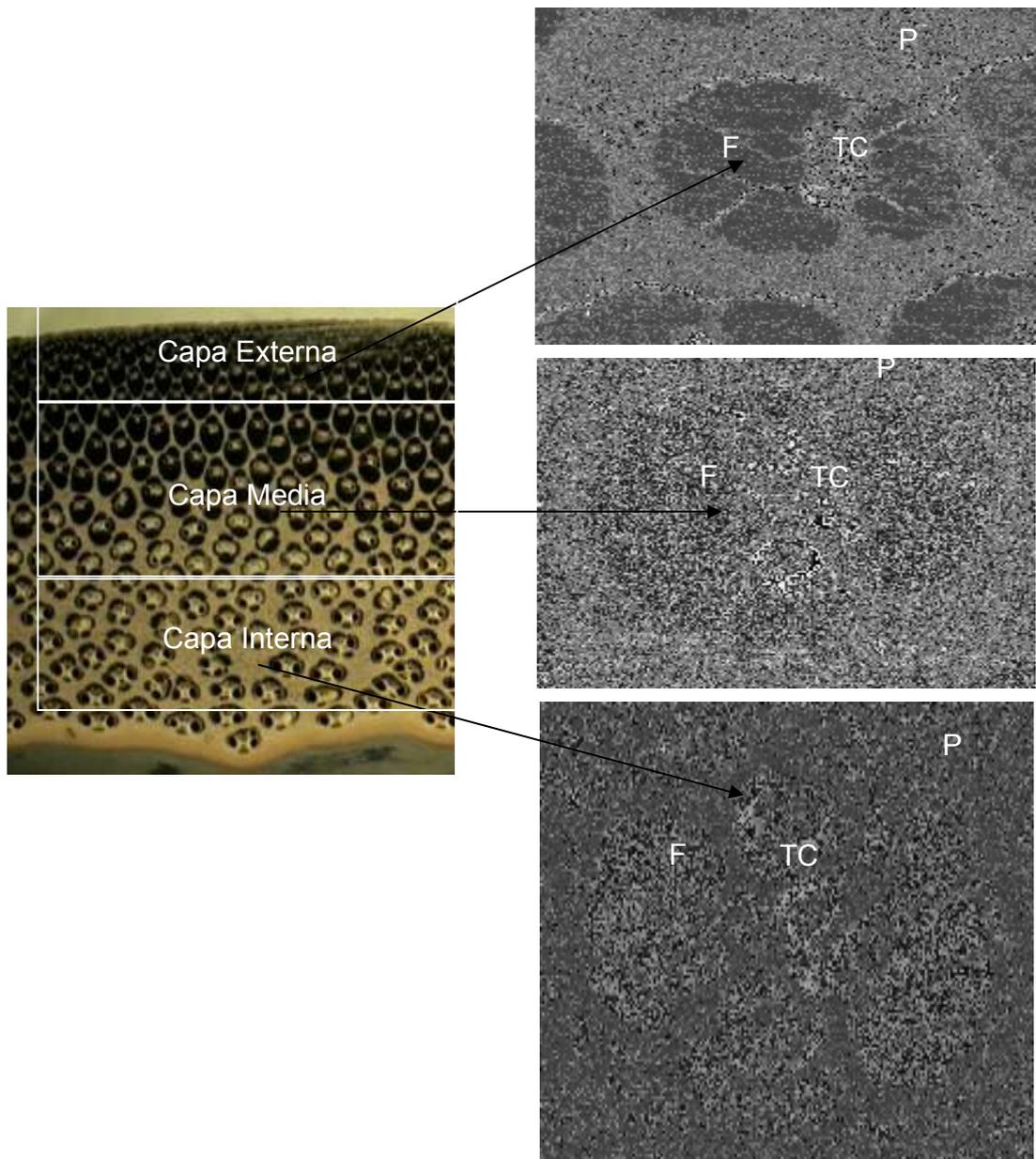


Figura 28. Distribución y forma de los haces vasculares: (F) fibra, (P) Parénquima, (TC) Tejido conductivo

El número de haces vasculares por unidad de área se muestra en la Figura 29. La cantidad de haces vasculares decrece de la capa externa

a la interna tanto en la basa como en la cepa, aspecto que coincide con lo reportado por Londoño et al (2002) en otra forma de GAK.

La Tabla 2, anexo A, presenta un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, en donde se observó que las partes y las zonas resultaron significativas para el número de haces vasculares por unidad de área ( $P < 0,05$ ).

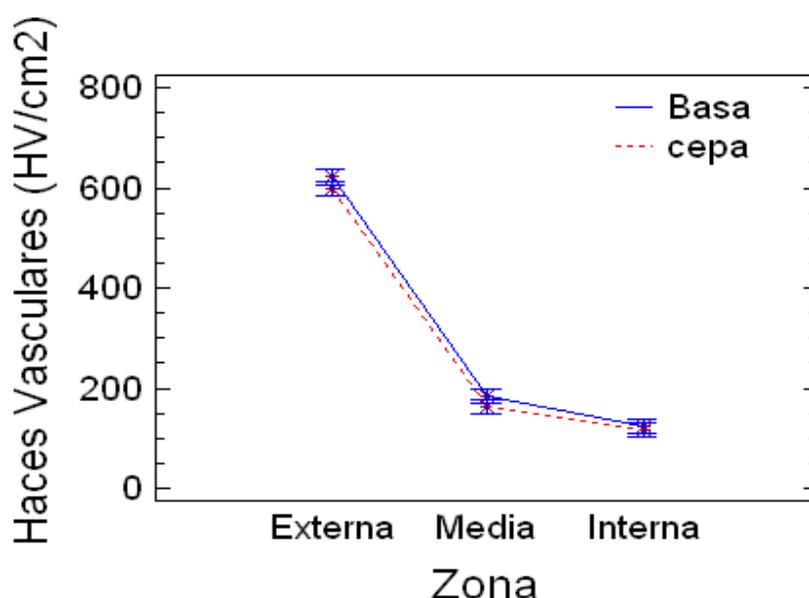


Figura 29. Número de haces vasculares por unidad de área en cada zona con intervalos LSD

La Tabla 15 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. El número de haces vasculares varió según la zona y se presentó diferencia significativa en cada una siendo la zona interna la de mayor presencia de porcentaje de número de haces. La basa respecto a la cepa presentó diferencia significativa, lo que coincide con lo reportado por Londoño et al (2002), y donde hay dispersión existente, se debe principalmente a que el número y la densidad de

haces vasculares es característica del desarrollo de cada culmo de guadua, la edad y de los lugares de donde se obtengan las probetas.

Tabla 15. Intervalos múltiples de Duncan para el número de haces vasculares.

<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	609,83	595,21	624,45	18	<i>Interna</i>
B	173,89	159,27	188,51	18	<i>Media</i>
C	119,34	104,72	133,96	18	<i>Externa</i>
<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	309,46	297,53	321,41	27	<i>Basa</i>
B	292,57	280,63	304,51	27	<i>Cepa</i>

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

Dentro del haz vascular se encuentra el tejido conductor, formado por vasos conductores, entre los cuales se encuentran dos vasos de metaxilema, uno de protoxilema y uno de floema, que se encuentran rodeados de células de fibra y de parénquima, cuya función es la del transporte de agua y nutrientes, y su estructura es importante para el entendimiento de las propiedades mecánicas según Lo et al. (2004) (Ver Figura 30).

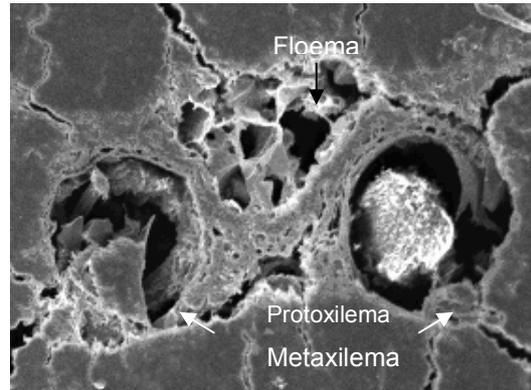


Figura 30. Tejido conductivo compuesto por metaxilema , protoxilema y floema

La Figura 31, muestra la estructura interna del protoxilema en la GAK. El protoxilema se encuentra ubicado entre dos grandes vasos de metaxilema y compuesto por una serie de anillos distribuidos uniformemente, recubiertos de células de parénquima y de fibras. Los anillos en el protoxilema sirven de aislantes entre las células de fibra, y están formados por tejido parénquimático. Estos anillos presentan diámetros promedios de 50  $\mu\text{m}$  en las capas medias e internas, y en la externa disminuye a 20  $\mu\text{m}$ , lo que se debe al tamaño de los haces vasculares en cada capa, y que permite una mayor concentración de células de fibras.

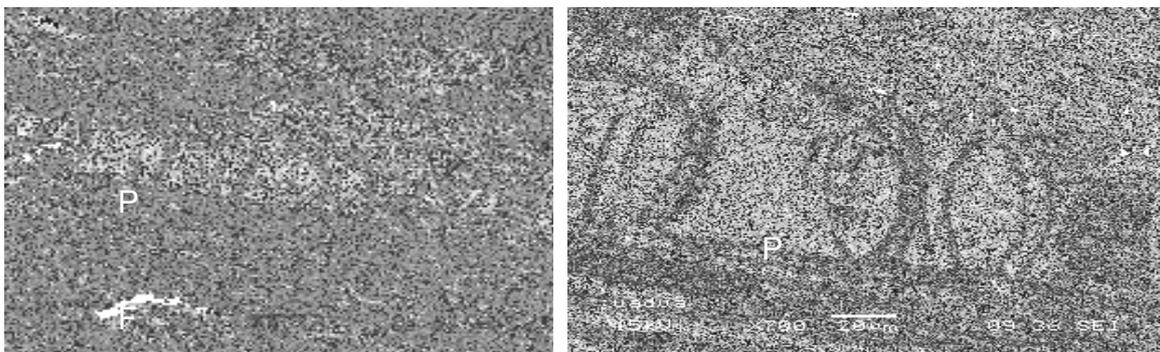


Figura 31. Vasos conductores de protoxilema (P:Parénquima; F: Fibra)

La Figura 32, da a conocer la distribución de las células de tejido conductivo en término de porcentaje de área del espesor total en la cepa y la basa. En la cepa el porcentaje de tejido conductivo aumenta de la capa externa a la interna, mientras que en la basa el tejido conductivo disminuye de la capa externa a la media y de esta se incrementa hacia la interna.

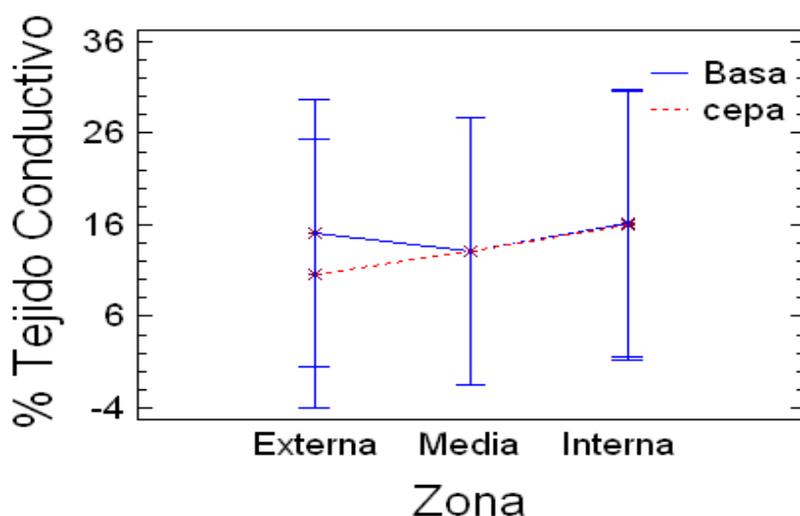


Figura 32. Distribución de tejido conductivo en la cepa y la basa con intervalos LSD

Al realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% se observó que los factores Zona y Partes resultaron significativos ( $P < 0,05$ ) (Ver Tabla 3, Anexo A). El porcentaje de tejido conductivo es significativamente superior en la basa que en la cepa. Entre la zona externa y media no se presenta diferencia significativa en el porcentaje de tejido conductivo, más si entre la interna y las demás capas (Ver Tabla 16).

Tabla 16. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de tejido conductivo.

Grupos	Media (%)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Zona

A	16,07	15,15	16,98	18	<i>Interna</i>
B	13,09	12,18	14,01	18	<i>Media</i>
B	12,86	11,94	13,78	18	<i>Externa</i>
<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	14,80	14,06	15,56	27	<i>Basa</i>
B	13,21	12,46	13,96	27	<i>Cepa</i>

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

Dentro de los haces vasculares, rodeando el tejido conductivo, se encuentra la zona que contiene las fibras de la GAK. Esas fibras pueden alcanzar la longitud del entrenudo al ser extraídas y obtienen diámetros entre los 250 y 550  $\mu\text{m}$  que dependen del tamaño del haz vascular, cuyas características son comunes en fibras naturales, según Schaffer (2000). Las fibras son unidas entre sí por células de parénquima (ver Figura 33).



Figura 33. Fibras de la GAK. En el extremo de las fibras, se observa que estas están formadas por unidades menores denominadas células de fibras, que se hallan en tamaños largos y cortos (ver Figura 34).

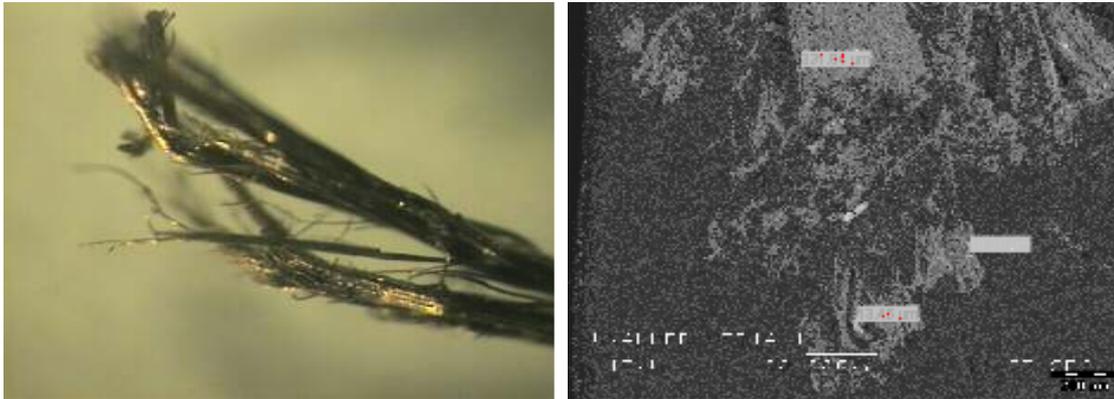


Figura 34. Células de fibra dentro de la fibra de la GAK

La Figura 35 muestra las formas de las células de fibra. Estas presentan formas alargadas cilíndricas y terminadas en punta, diferenciándose de otras especies de bambúes como los *Phyllostachys*, que según Liese (1998), presentan terminaciones en tenedor. Esas células al igual que las fibras, se encuentran unidas entre sí por tejido parenquimático, y su orientación al interior de la fibra es en sentido longitudinal o paralelo al culmo. De cada célula de fibra parece desprenderse una serie de microfibrillas cuyo espesor promedio es de 0,6  $\mu\text{m}$ , lo cual según Murphy et al (1992), se encuentra en otros tipos de bambúes como el *Phyllostachys edulis*.

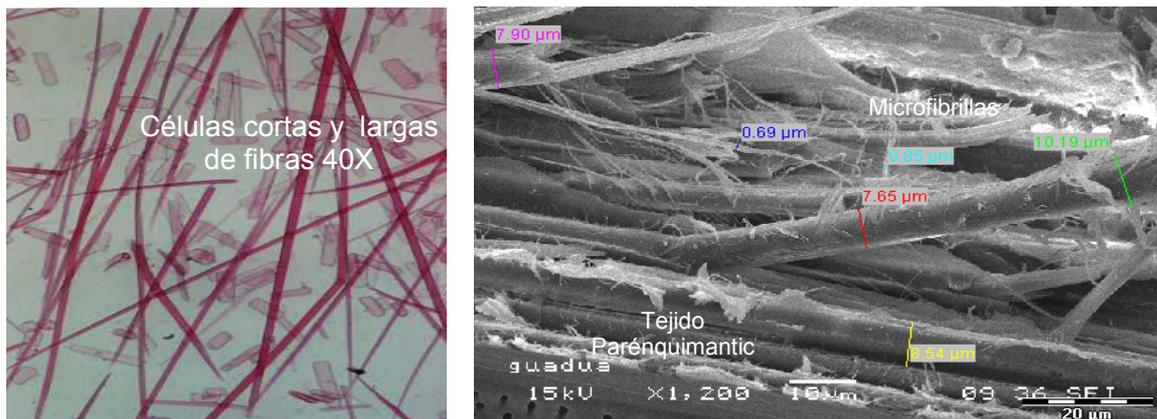


Figura 35. Forma de las células de fibras de la GAK.

La Figura 36, muestra un aspecto general de la estructura de las células de fibra. En ella se observa paredes alternadas en capas gruesas y

delgadas con diferente orientación de las microfibrillas orientadas longitudinalmente en pequeños ángulos sobre el eje de la célula de la fibra, aspecto que coincide con el descrito por Amada et.al (1996), Tono y Ono (1962), así como Parameswaran y Liese (1976) en estudios realizados en otros bambúes.

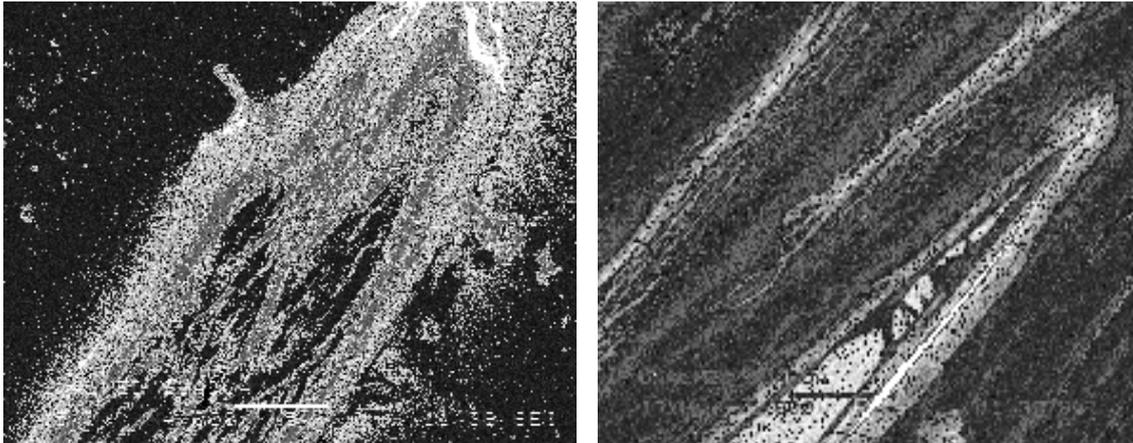


Figura 36. Aspectos generales de la estructura de las células de fibras

Cada célula de fibra presenta en su centro una cavidad denominada lumen, en cuyo interior se almacena agua, minerales y se encuentra el núcleo de la célula. Según Liese (1998), el lumen juega un papel importante en la flexibilidad del material dado el comportamiento inelástico que le imparte desde las células de la fibra (ver Figura 37).

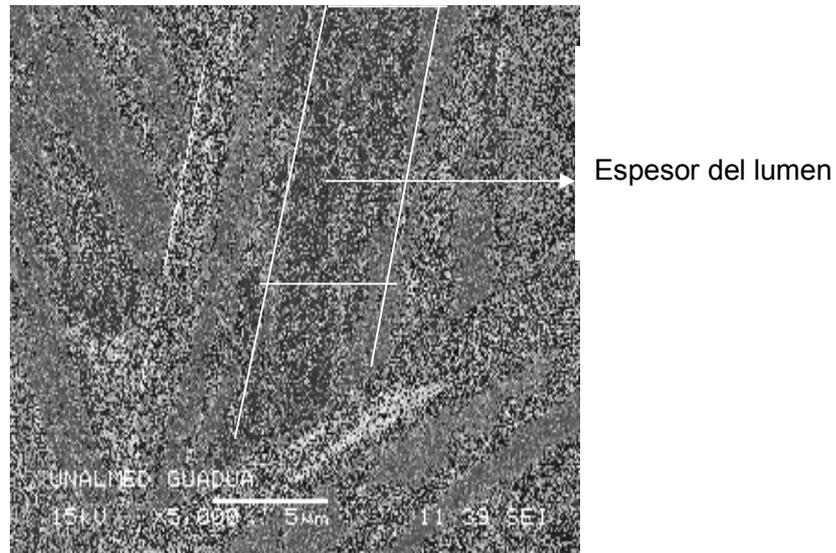


Figura 37. Espesor de la célula de fibra y del lumen de la GAK.

La Figura 38 a), muestra la estructura multicapas que se alcanzó a detallar de las células de fibra de la GAK, mientras que las Figuras 38 b) y 38 c) dan a conocer la estructura que se detalla en los bambúes, que según Liese (1998) es denominada como polilaminar.

Esta estructura multicapas en las células de las fibras de la GAK, no fue posible diferenciarla con precisión, lo que se debió a la técnica de muestreo, sin embargo, la estructura encontrada parece acercarse al modelo polilaminar planteado por Liese (1998), para los bambúes, donde además se observa que la disposición de las paredes de las células de las fibras son axiales al eje de la célula, que coincide con los modelos presentados por Anne et al (1998), y por Bruce, M (2003).

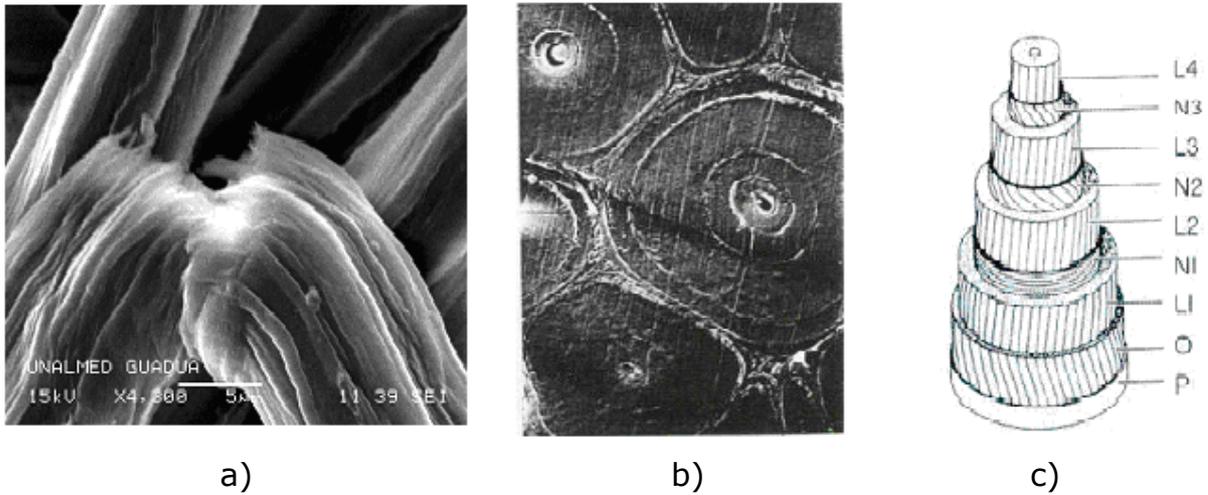


Figura 38. a) Estructura de la célula de fibra de la GAK. b) Multicapas de bambú *Phyllostachys viridiglaucescens* (Liese, 1998). c) Modelo de la estructura polilaminar multicapas (1998).

La Figura 39, da a conocer la distribución de las células de fibra en término de porcentaje de área del espesor total en la cepa y la basa. El porcentaje de fibras tanto en la cepa como en la basa, disminuye de la capa externa a la interna.

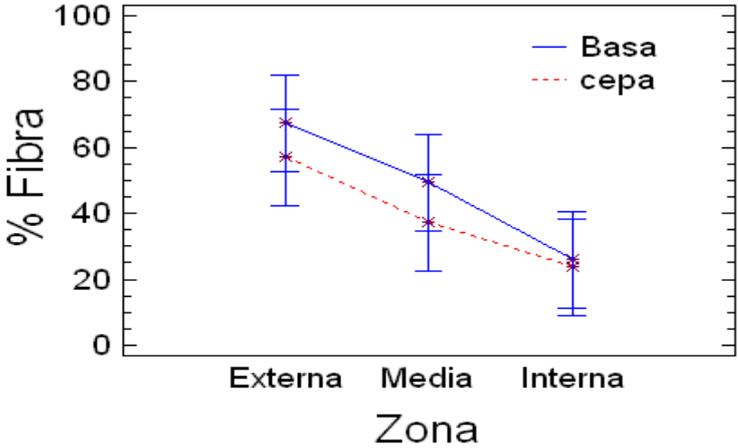


Figura 39. Distribución de células de fibra en la cepa y la basa con intervalos LSD

En un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, se observó que los factores Zona, Partes resultaron significativos ( $P < 0,05$ ) (Ver Tabla 4, Anexo A).

La Tabla 17 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. La variable porcentaje en la distribución de las células de fibra varió según la zona presentándose diferencia significativa entre la zona externa, media y la interna, siendo mayor dicho porcentaje en la capa externa de la basa con respecto a la cepa lo que coincide con lo descrito por Tong et.al (1995) en otros bambúes.

Tabla 17. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de fibra.

<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	62,265	60,928	63,602	18	Externa
B	43,3594	42,0224	44,6964	18	Media
C	24,8983	23,5613	26,2353	18	Interna
<b>Grupos</b>	<b>Media (%)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	47,5985	46,5069	48,6902	27	Basa
B	39,4167	38,325	40,5083	27	Cepa

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

En la Figura 40, se dan a conocer la longitud promedio de las células de fibra en el espesor total en el entrenudo. Se encontró que la longitud de las células de fibras decrece de la zona externa a la interna para la cepa y la basa.

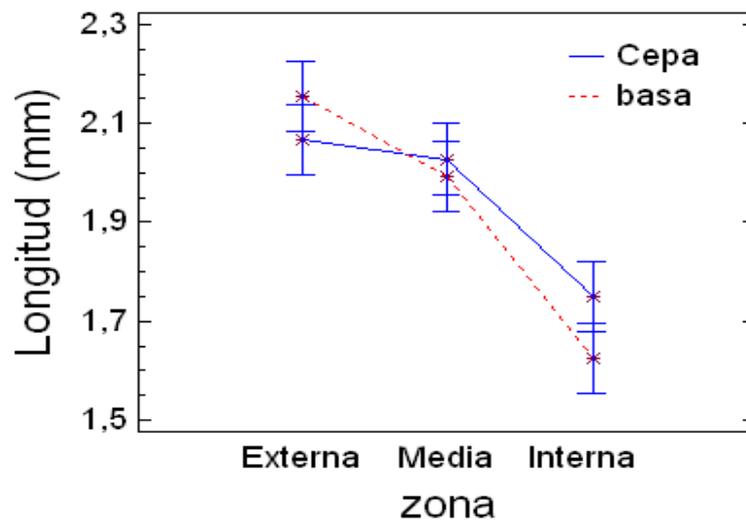


Figura 40. Longitud promedio de fibras por zona en la cepa y la basa con intervalos LSD

La Tabla 18 presenta un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, para la variable longitud de fibras, se observó que el factor Zona (Externa, Media e Interna), resultó significativo ( $P < 0,05$ ). Pero el factor Partes (Cepa y Basa) y la interacción zona\*partes no ( $P > 0,05$ ). Esto quiere decir que la longitud de las fibras solo es afectada por las zonas.

Tabla 18. Análisis de varianza para longitud de fibras.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	pr > f
zona	9,74	2	4,87	37,24	<0,0001
Partes	0,04	1	0,04	0,31	0,5767
Zona*partes	0,56	2	0,28	2,16	0,1167
Error	38,44	294	0,13		
Total	48,79	299			

Número de observaciones 300  
(1,9237)

$R^2 = 0,9742$

Durbin Watson mayor que 1,4

La Tabla 19 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. La variable longitud promedio de las células de fibra varió según la zona; no se presentó diferencia significativa entre la zona externa y media. Los valores medios encontrados de la longitud de la fibra no presentan mucha dispersión de los encontrados por Liese (1998), el cual reportó para la GAK valores de 1,6 mm, que coinciden

con los encontrados en la zona interna tanto de la cepa como de la basa, más por los resultados encontrados por Wang Zheng Guo Wenjing (2002).

Tabla 19. Intervalos múltiples de Duncan para la longitud promedio de las células de fibra.

Grupos	Media (mm)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Zona
A	2,11	2,03	2,18	100	Externa
A	2,01	1,93	2,08	100	Media
B	1,68	1,61	1,75	100	Interna

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

La Figura 41, da a conocer la distribución de células de fibra cortas en porcentaje, en cada una de las capas analizadas en el entrenudo de la cepa y la basa, entendiéndose como fibras cortas aquellas menores de 2mm de longitud. Las mayores cantidades de fibra corta se encontraron en la capa interna tanto en la cepa como en la basa, además se halló que el porcentaje de fibras cortas en las capas medias e internas son mayores en la basa que en la cepa, mientras que en la capa externa es mayor el contenido en la basa. Estos resultados se consideran de suma importancia a la hora de seleccionar el material para procesos como la obtención de pulpa para la elaboración de papel, en donde existen grandes intereses por las fibras cortas

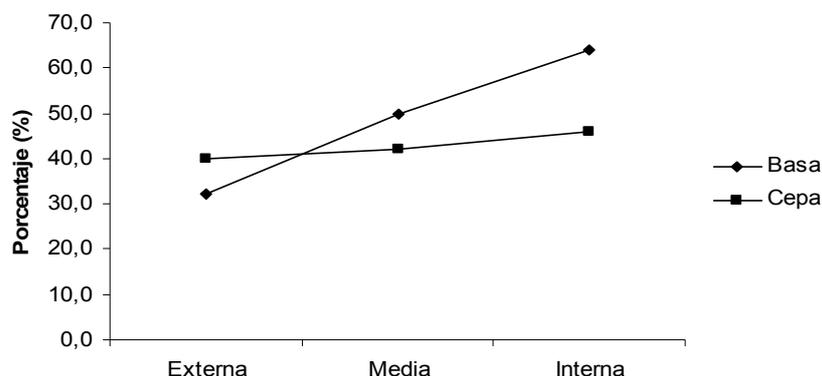


Figura 41. Distribución de células de fibras cortas en la cepa y la basa

En la Figura 42, se dan a conocer los valores de los espesores de las células de fibras en la cepa y en la basa. Se encontró que el espesor de las células decrece de la capa externa a la interna.

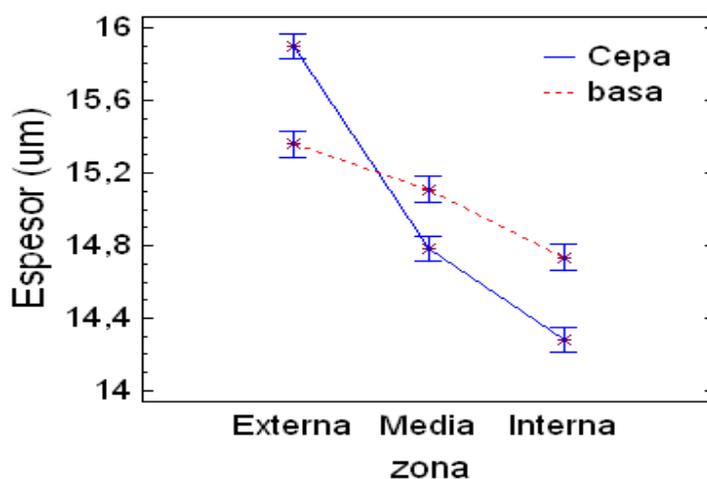


Figura 42. Espesor de fibras por zona en la cepa y la basa con intervalos LSD.

La Tabla 20 presenta un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, para la variable espesor de fibras, se observó que el factor Zona (Externa, Media e Interna), resultó significativo ( $P < 0,05$ ). Pero el factor Partes (Cepa y Basa) y la interacción zona\*partes no ( $P > 0,05$ ). Esto quiere decir que la el espesor de las fibras solo es afectada por las zonas.

Tabla 20. Análisis de varianza para espesor de fibras.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	pr > f
Zona	63,71	2	31,85	6,09	0,0026
Partes	0,46	1	0,46	0,09	0,7661
Zona*partes	14,55	2	7,27	1,39	0,2506
Error	1539,14	294	5,23		
Total	1617,88	299			

Número de observaciones 300  
(2,5412)

$R^2 = 0,9032$

Durbin Watson mayor que 1,4

La Tabla 21 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. El espesor de las células de fibra varió según la zona, no se presentó diferencia significativa entre la zona media e interna, pero si entre la zona externa con las demás zonas o capas. Los valores promedios encontrados para espesores, difieren aproximadamente en un 18% de los reportados por Liese (1998) en otros bambúes, cuyo valor promedio es de 11  $\mu\text{m}$ , aspecto que se debe a las características de desarrollo y condiciones de establecimiento de cultivo, la especie de bambú estudiada.

Tabla 21. Intervalos múltiples de Duncan para el espesor de las células de fibra.

<b>Grupos</b>	<b>Media (um)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	15,628	15,1777	16,0783	100	<i>Externa</i>
B	14,946	14,4957	15,3963	100	<i>Media</i>
B	14,508	14,0577	14,9583	100	<i>Interna</i>

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

En el nudo, la forma y composición de la estructura interna de la fibra y de las células de fibras, son similares que las del entrenudo, solamente que en esta zona, las fibras alcanzan la longitud del espesor del nudo al extraerlas, y estas se encuentran formadas únicamente por células cortas de fibras.

Las fibras son discontinuas con dirección aleatoria, cuyo aspecto coincide por el descrito con Liese (1998) y Lo et al (2004), y se conoce como la anastomosis dentro de la región nodal, lo que permite en cierta manera una reducción de resistencia en dicha zona cuando el material es sometido a esfuerzos principalmente a los de flexión (ver Figura 43).

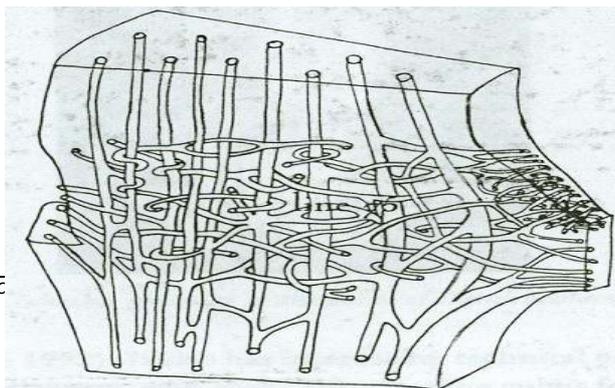


Figura 43. Anastomosis en la región nodal (Liese, 1998).

La Figura 44, muestra la longitud de las células de fibras en cada una de las capas estudiadas en el nudo. Al igual que en el entrenudo, la longitud de las fibras tanto en la cepa como en la basa disminuye de la capa externa a la interna, aspecto que se relaciona con la resistencia de cada capa en manera particular. La longitud entre la basa y la cepa, no presenta diferencias significativas en sus valores.

La longitud de las células de fibra en el nudo son el 50% en promedio menores que las que se encuentran en el entrenudo, aspecto que incide notoriamente en la resistencia del material según LÍESE (1998), ya que la configuración de las fibras en el nudo presenta una discontinuidad con respecto al entrenudo, convirtiendo al material en el nudo en un punto de baja resistencia.

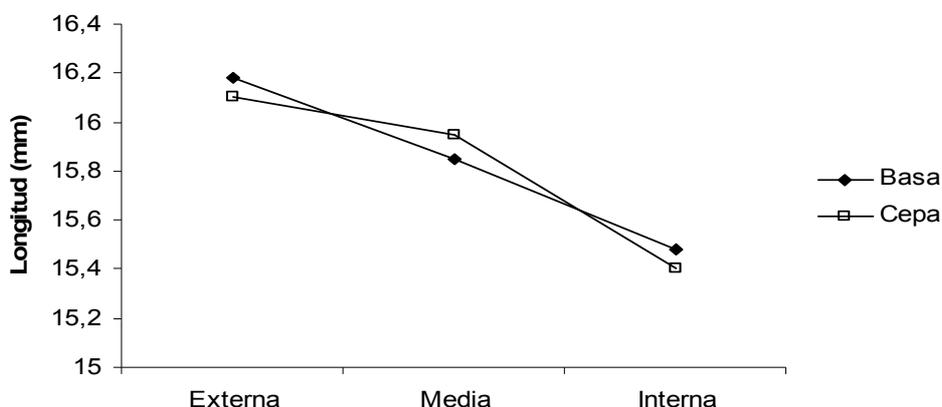


Figura 44. Longitud promedio de fibras por zona

### 4.3 PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS

#### 4.3.1 Densidad

La Figura 45, da a conocer valores de densidad del espesor total en el nudo y entrenudo del elemento tanto en la cepa como en la basa. Se encontró que la densidad presenta mayores valores en la basa que en la cepa, y que estos aumentan con la presencia del nudo (ver gráfica 3). Estos valores y comportamientos encontrados coinciden con los reportados por Hidalgo (2003), González y Díaz (1992) y Osorio et al. (2005), quienes dieron a conocer valores de 0,5 a 0,9 gr/cm<sup>3</sup>, de 0,57 a 0,60 gr/cm<sup>3</sup> y de 0,6 a 0,7 gr/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

La diferencia que se presenta entre los resultados encontrados con respecto a los reportados por otros autores, radica en la procedencia del material que depende de las características de las plantaciones en términos de edad, y desarrollo de cada especie.

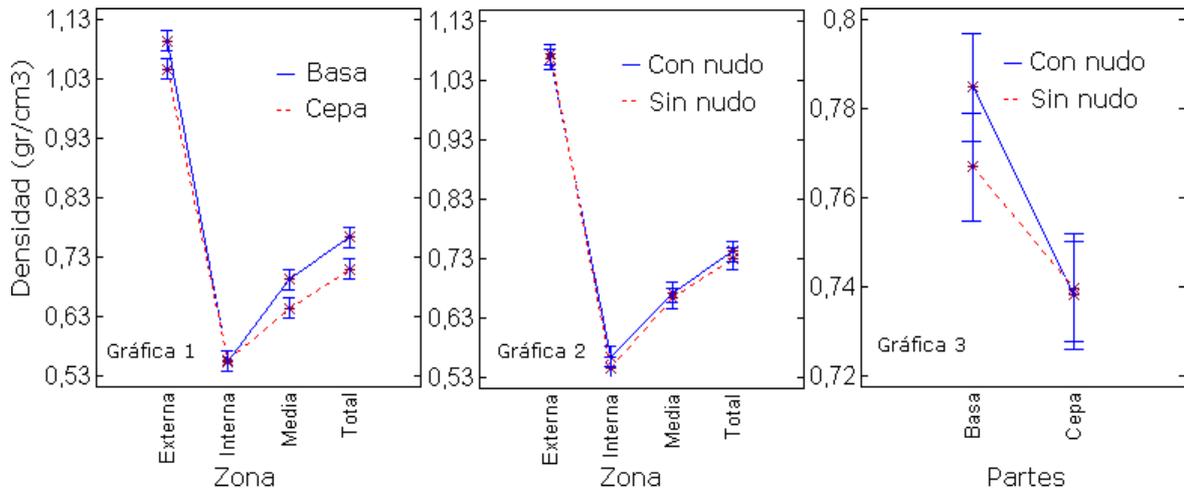


Figura 45. Densidad a nivel de la cepa y basa en el espesor total

Al realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% se observó que los factores Zona (Externa, Media e Interna) y Partes (Cepa y Basa) resultaron significativos ( $P < 0,05$ ) (Ver Tabla 5, Anexo A). Esto quiere decir que la densidad, es afectada por las zonas y partes en que se realizaron las pruebas de las probetas.

La Tabla 22 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. La densidad varió según la zona presentándose diferencia significativa entre la zona externa, media, interna y total, siendo mayor en la capa externa. Con respecto a los nudos y las partes no se presentó diferencia significativa.

Tabla 22. Intervalos múltiples de Duncan para la densidad.

<b>Grupos</b>	<b>Densidad Media (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	1,07	1,05	1,08	48	Externa
B	0,55	0,53	0,57	48	Interna
C	0,66	0,65	0,68	48	Media
D	0,73	0,71	0,75	48	Total

Grupos	Densidad Media (gr/cm <sup>3</sup> )	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Nudos
A	0,76	0,74	0,77	96	Si
A	0,75	0,74	0,76	96	No
Grupos	Densidad Media (gr/cm <sup>3</sup> )	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Partes
A	0,77	0,76	0,78	96	Basa
A	0,73	0,72	0,75	96	Cepa

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

La Figura 46, muestra la relación que existe entre la densidad del espesor total con la estructura interna del material en la cepa y la basa. El porcentaje de tejido conductivo entre la basa y la cepa no varía significativamente, lo que permite concluir que este parámetro no presenta mayor peso en la variación de los valores de densidad en el material, además por ser esta parte de la estructura una sección hueca.

En la cepa el parámetro que más influye en la determinación de la densidad es el parénquima mientras que en la basa es la fibra, aspecto que se debe a que tanto la fibra como el parénquima mantienen sus densidades constantes indistintamente de la zona o parte de donde se extraigan, aspecto que coincide con lo denotado por Zhou F.C (1981), en estudios realizados en otros bambúes.

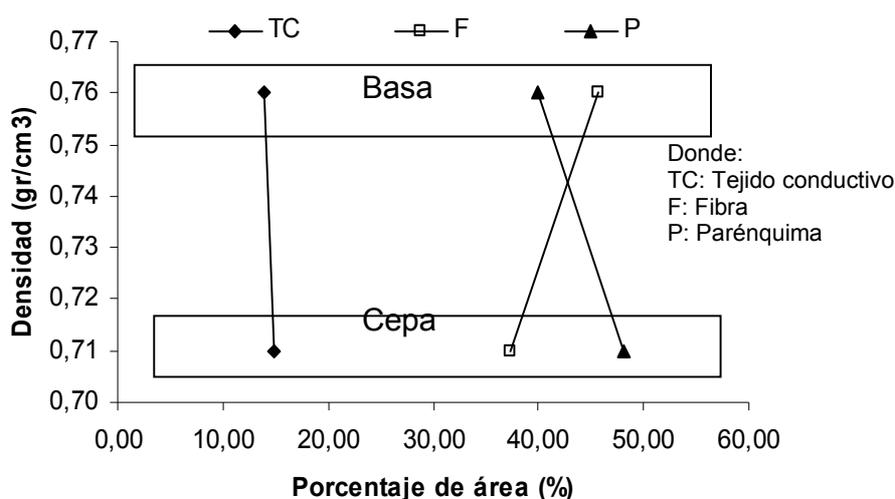


Figura 46. Relación de la densidad con la estructura interna en el espesor total

La Tabla 23, muestra tendencias del comportamiento de la densidad con la estructura interna en el espesor total. Estas tendencias permiten predecir con un nivel de confianza del 95%, la tendencia de los valores de la densidad del material en el rango de los valores encontrados en la cepa y la basa, en función de la estructura interna para la GAK, cuyos resultados fortalecen el análisis realizado a partir de la Figura 44.

Tabla 23. Tendencias para predecir la densidad en función de la estructura interna en el espesor total

	<b>Modelos más ajustados</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Valor de P</b>
<b>Cepa</b>	$Densidad = 0,0012 * Fibra^2 - 0,082 * fibra + 2,067$	0,76	0,021
<b>Basa</b>	$Densidad = 0,014 * Fibra + 0,1082$	0,72	0,035

La Figura 47, muestra valores de densidad en cada una de las capas que conforman el espesor total en la basa y la cepa. Los valores de densidad para cualquier capa analizada son mayores en la basa que en la cepa, y en cualquiera de las capas del material, son mayores cuando se tiene nudo que sin nudo. Tanto en la cepa como en la basa, se encontró que la densidad disminuye de la capa externa a la interna, aspecto que se observa tanto en el entrenudo como en el nudo del elemento, y que concuerda con los resultados encontrados por Nogata et.al (1995) citados por Hidalgo (2003), en bambú *Phyllostachys pubescens*.

Según la JUNAC (1984), los valores de densidad para la capa externa, clasifican a esta capa como una madera dura clase A, mientras que las capas media e interna se pueden clasificar como madera semidura tipo B y blanda tipo C respectivamente.

Estos valores de densidad son importantes a la hora de seleccionar materiales para procesos industriales así como para su uso estructural, ya que a manera de ejemplo, Ahmad (2000), recomienda para la fabricación de tableros, materiales compuestos con densidades menores o iguales a  $0,6 \text{ gr/cm}^3$

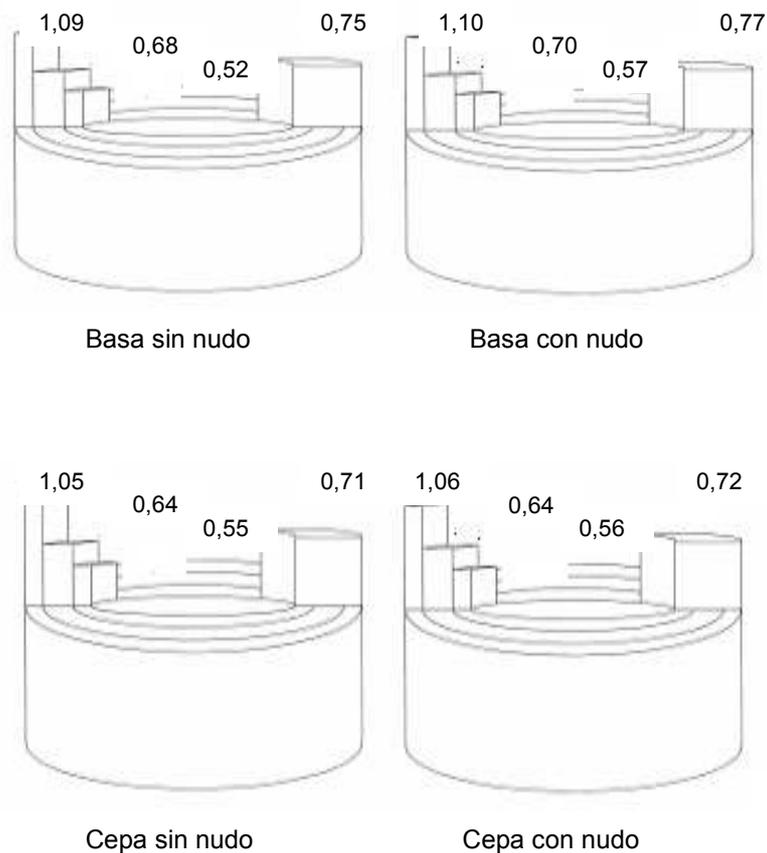


Figura 47 Densidad en la basa y la cepa en ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

La Figura 48, da a conocer la relación de la densidad con la estructura interna en las capas del espesor total. Al igual que en el espesor total se observa que el porcentaje de tejido conductivo no varía significativamente entre la capa externa a la interna tanto en la cepa como en la basa, por lo que éste es poca la influencia que ejerce en la variación de los valores de densidad. Las células de fibra son responsables de los mayores valores de densidad en la capa externa y media, mientras que en la capa interna lo es el parénquima, debido a que la cantidad células de fibra como sus espesores y longitudes disminuyen hacia la capa interna, lo que coincide con lo descrito por

Zhou (1981), y por Nogata et.al (1995) citado por Hidalgo (2003), en estudios adelantados en otros tipos de bambúes.

Para valores de densidades constantes, la influencia de las fibras y del parénquima en la basa siempre es mayor respecto a la cepa, lo que se refleja en mayores valores de densidad.

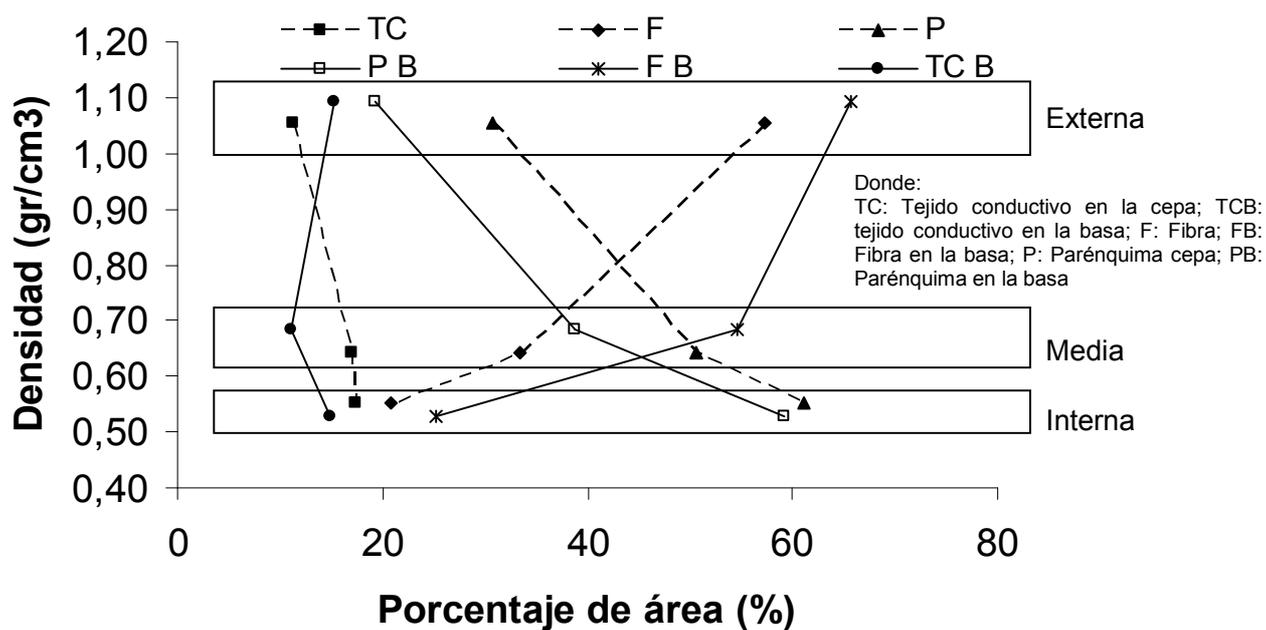


Figura 48. Relación de la densidad con la estructura interna en las capas

La Tabla 24, muestra tendencias obtenidas para explicar el comportamiento de la densidad con la estructura interna en cada una de las capas. Con un nivel de confianza del 95%, los modelos encontrados muestran tendencias del comportamiento con la estructura interna, más no se pueden utilizar para predecir los valores de densidad en cada una de las capas estudiadas, dentro de los rangos reportados a nivel de la cepa y la basa. Las ecuaciones encontradas fortalecen los resultados descritos con antelación, que partieron de la Figura 49.

Tabla 24. Tendencias para determinación de la densidad en función de la estructura interna en las capas

Capa	Tendencias más ajustadas	R <sup>2</sup>	Valor de P
------	--------------------------	----------------	------------

<b>Cepa</b>	Externa	$Densidad(g/cm^3) \approx 0,50208 + 0,0097118 * Fibra$	0,81	0,014
	Media	$Densidad(g/cm^3) \approx 0,495797 + 0,00439494 * fibra$	0,81	0,011
	Interna	$Densidad(g/cm^3) \approx 1,66022 - 0,01813 * parenquima$	0,75	0,006
<b>Basa</b>	Externa	$Densidad(g/cm^3) \approx 0,894724 + 0,0029529 * fibra$	0,72	0,038
	Media	$Densidad(g/cm^3) \approx 0,154679 + 0,0096 * fibra$	0,78	0,003
	Interna	$Densidad(g/cm^3) \approx 1,04918 - 0,009118 * parenquima$	0,75	0,018

### 4.3.2 Resistencia a flexión

La Figura 50 presenta la resistencia bajo cargas radiales y tangenciales, con nudo y sin nudo. La figura muestra un aumento de la resistencia entre el sentido radial al tangencial. Las resistencias en las zonas sin nudo o del entrenudo, son menores que en aquellas que presentan nudos, tanto para resistencias radiales como tangenciales, cuyo comportamiento es similar al encontrado por Zhou (1981), en *Phyllostachys pubescens*.

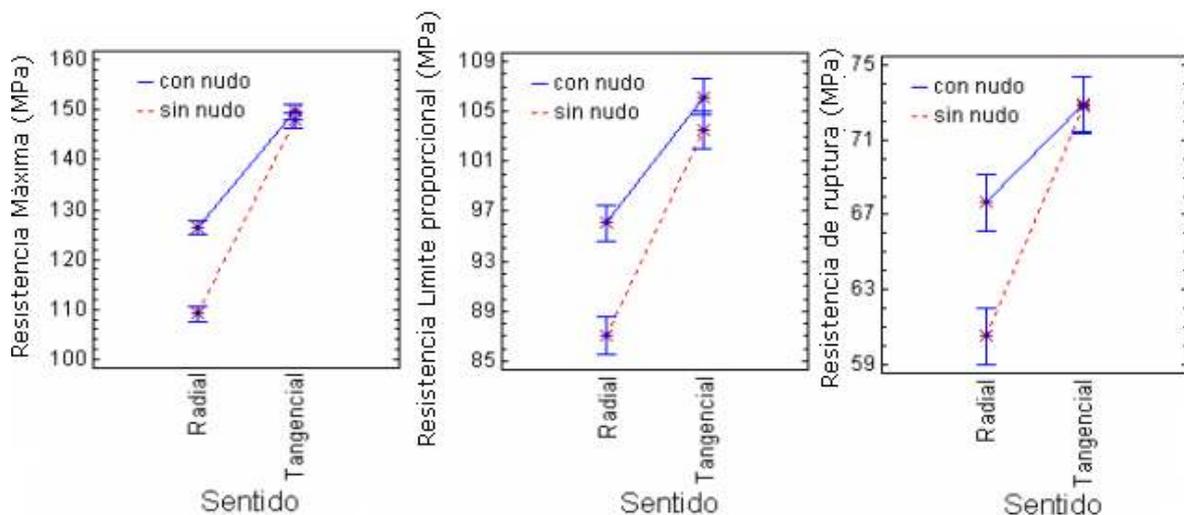
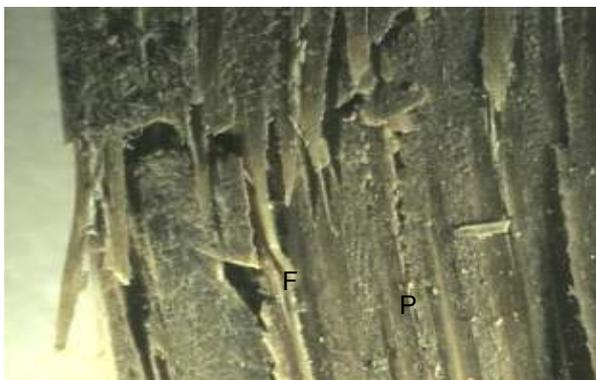


Figura 49. Resistencia radiales y tangenciales, con nudo y sin nudo.

La disminución de resistencia en el material sin nudo, se debe principalmente a la discontinuidad de las fibras entre el entrenudo y el nudo, convirtiéndose de esta manera el nudo, en un punto de baja resistencia cuando se aplican cargas sobre él, aspecto también denotado por Liese (1998). Dicha discontinuidad en el nudo tanto con resistencias radiales como tangenciales, ocasiona que la probeta falle súbitamente comportándose como un material frágil, donde la falla bajo esfuerzos tangenciales y esfuerzos radiales se presenta primero por la ruptura de

las células de fibra, aspecto que Amada (2001), denomina "primer rompimiento de las fibras" (ver Figura 50).



Zona total con nudo fallada con cargas tangenciales



Zona total con nudo falladas a cargas radiales: (f) son fibras, (p) parénquima

Figura 50. Fallas en el nudo bajo resistencias radiales y tangenciales

En las probetas con ausencia de nudos sometidas tanto a resistencia radiales como tangenciales, las fallas se producen en la mayoría de las veces por aplastamiento, comportándose como un material dúctil, aspecto que se debe más a la continuidad de las fibras en el material (ver Figura 51).



Falla por aplastamiento zona total

Figura 51. Falla por aplastamiento en la zona total

La Tabla 25 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. La variable resistencia cambió según la zona presentándose diferencia significativa entre la zona externa, media, interna y total, siendo mayor en la capa externa, esto se debe a que es la que mayor porcentaje de fibras y de contenido de silicio presenta, y se relaciona con una alta resistencia del material. Entre la basa y la cepa tanto con nudos como sin nudos, y en sentido radial y tangencial

existen diferencias significativas, lo que permite comprobar la heterogeneidad del material.

Tabla 25. Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia.

<b>Grupo</b>	<b>Resistencia máxima Media (MPa)</b>	<b>Resistencia límite proporcional Media (MPa)</b>	<b>Resistencia de ruptura Media (MPa)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	249,11	180,08	109,34	32	Externa
B	76,085	55,80	41,13	32	Interna
C	101,23	67,10	49,17	32	Media
D	106,59	89,84	74,23	32	Total
<b>Grupo</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Nudos</b>
A	138,01	101,10	70,27	64	Si
B	128,50	95,31	66,68	64	No
<b>Grupo</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	145,42	108,92	77,67	64	Basa
B	121,09	87,48	59,27	64	Cepa
<b>Grupo</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Media (MPa)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Sentido</b>
A	117,78	91,55	64,08	64	Radial
B	148,74	104,86	72,85	64	Tangencial

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

La Figura 52, muestra la relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en el espesor total. Se observa la poca influencia que presenta el tejido conductivo en la cepa y la basa, tanto con resistencias radiales como tangenciales dado que sus valores se mantienen casi constantes.

Bajo resistencias radiales, tanto en la cepa como en la basa del elemento las fibras son las mayores responsables de los valores de la resistencia, aspecto que se debe a los mayores contenidos de estas células en las partes del culmo evaluadas. Tanto en la cepa como en la basa bajo resistencias tangenciales, las células de fibras como del parénquima son responsables en igual magnitud de la resistencia del material, lo que se debe a que estas células se encuentran distribuidas en cantidades muy similares en el espesor total.

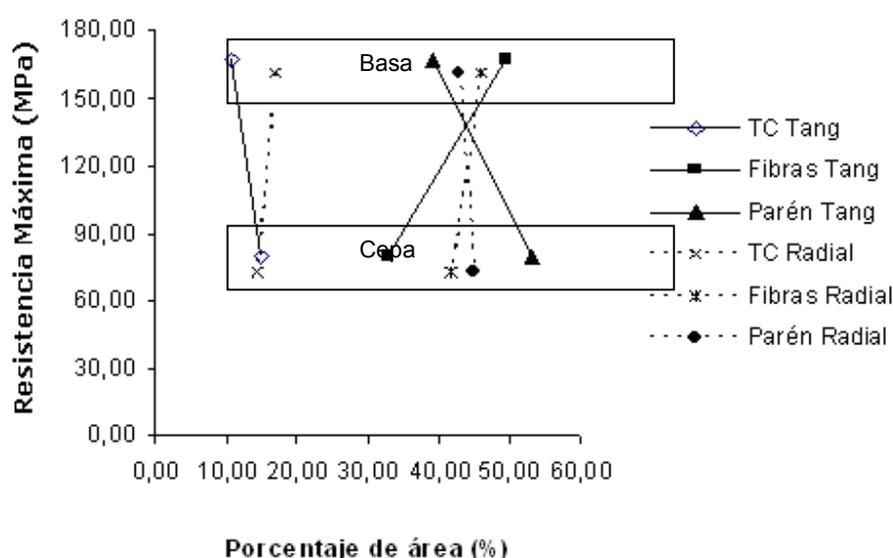


Figura 52. Relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en el espesor total

La Tabla 26, muestra tendencias del comportamiento de las resistencias radiales y tangenciales con la estructura interna en el espesor total. Con un nivel de confianza del 95%, los modelos encontrados se pueden utilizar para predecir los valores de esfuerzos en el espesor total, dentro de los rangos reportados a nivel de la cepa y la basa. Las ecuaciones encontradas fortalecen los resultados descritos con antelación, que partieron de la Figura 53.

Tabla 26. Tendencias para determinación de las resistencias máximo en el espesor total en función de la estructura interna.

	Tendencias más ajustados	R <sup>2</sup>	Valor de P
--	--------------------------	----------------	------------

<b>Cepa Radial</b>	$Esf(MPa) \approx 108,858 - 0,553788 * Parenquima(\%)$	0,96	0,032
<b>Basa Radial</b>	$Esf(MPa) \approx 81,40 + 1,5975 * fibra(\%)$	0,99	0,003
<b>Cepa Tangencial</b>	$Esf(MPa) \approx 64,2357 + 0,40620 * parenquima(\%)$	0,91	0,047
<b>Basa Tangencial</b>	$Esf(MPa) \approx -19.2164 + 4.0841 * Fibra(\%)$	0,98	0,019

Las Figuras 53 y 54, muestran los valores de las resistencias radiales y tangenciales en cada una de las capas estudiadas, tanto en la basa como en la cepa, con la presencia y ausencia de nudos.

Tanto en la cepa como en la basa, se presentan comportamientos similares a espesor total en cada una de las capas analizadas, ya que se encontró mayores valores de resistencias en las probetas sin nudo que con nudo, y que las resistencias radiales son ligeramente mayores que los tangenciales, sin presentarse mucha dispersión entre los valores.

Las resistencias decrecen de la capa externa a la interna, independientemente de la ausencia o presencia de nudos en el material, aspecto que se debe a una mayor concentración, longitud y espesor de las fibras en las zonas de mayor resistencia, lo que coincide con lo reportado por Murphy et al (1992). La capa externa alcanza casi dos veces los valores de resistencia con respecto al espesor total, aspecto que se debe a la presencia de la corteza que contiene un mayor porcentaje de fibra, lo cual concuerda con lo reportado por Liese (1998) y Zhou (1981). Lo anterior, es importante a tener en cuenta ya que en la industria de laminados, la capa externa es la capa que se desecha durante el proceso, utilizando solamente las zonas medias e internas, lo que se traduce en una disminución en la resistencia del producto final.

Tanto en la cepa como en la basa, los valores de la capa media se aproximan a los de la zona total, lo cual es más notorio en las resistencias radiales que en los tangenciales, ya que cuando las probetas son sometidas a cargas, la capa media ocupa aproximadamente el 75% del espesor total. La capa interna es la que menores resistencias soporta, aspecto que se debe a la fragilidad del material, ya que esta capa se encuentra conformada principalmente por células de parénquima que le proporcionan poca resistencia.

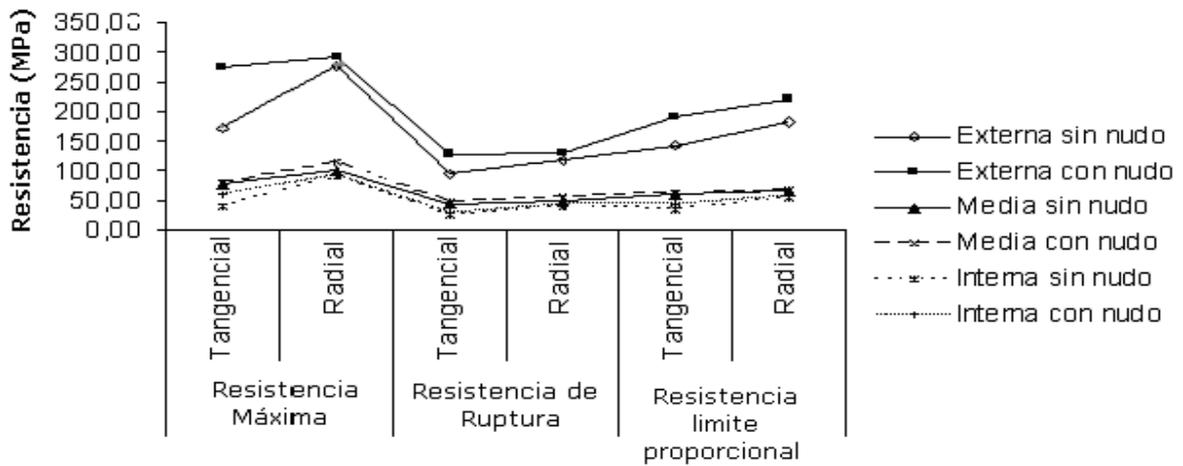


Figura 53. Resistencias radiales y tangenciales de las capas en la basa

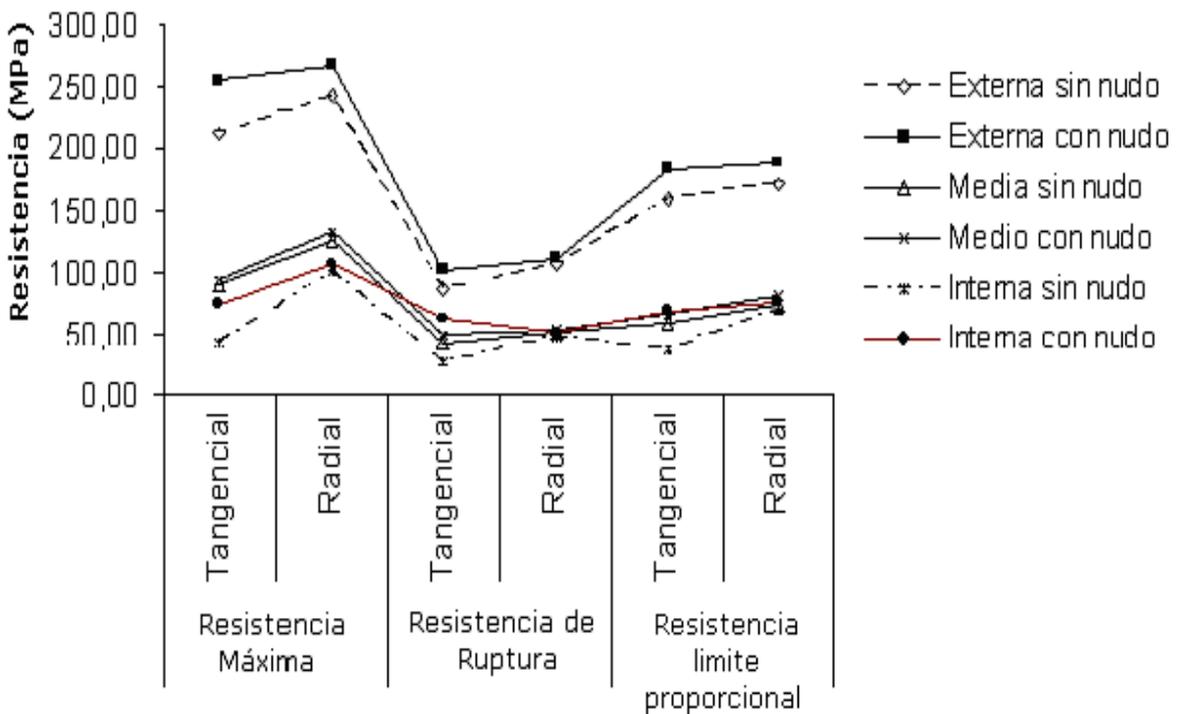


Figura 54. Resistencias radiales y tangenciales en las capas de la cepa

La Figura 55, muestra la relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en la capa externa. Al igual que en el espesor total, se observa la poca influencia que presenta el tejido conductivo en la cepa y la basa, tanto con las resistencia radiales como tangenciales,

sin embargo, en la basa del elemento, cuando se somete a resistencia radial, el tejido conductivo tiene mayor influencia comparado con las demás partes del elemento. El alto porcentaje de células de fibra es el mayor responsable de los valores de resistencias radiales y tangenciales en la capa externa tanto en la cepa como en la basa, lo que se debe al alto porcentaje de fibras y a la presencia de la corteza en esta capa, aspecto que coincide con lo reportado por Lo et al (2004), quien da a conocer que la mayor cantidad de fibras en los bambúes es un indicador de una mayor resistencia mecánica.

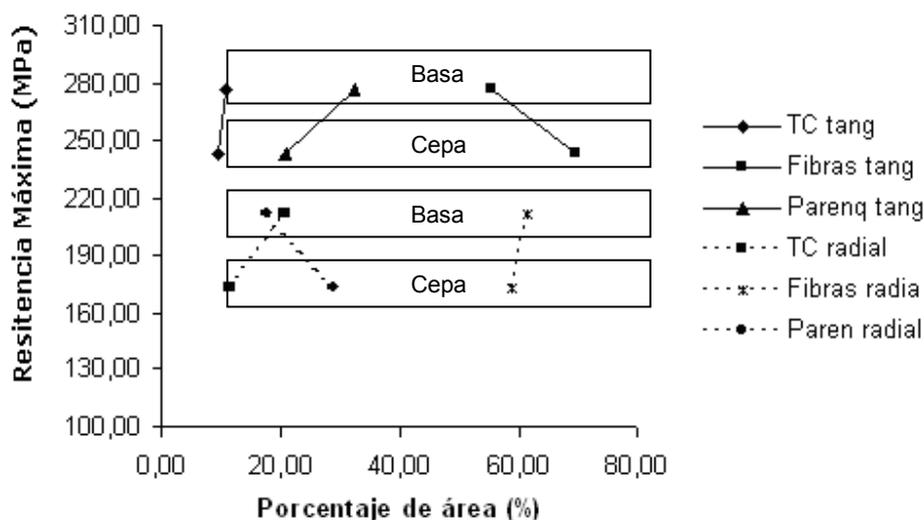


Figura 55. Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa externa

La Figura 56, muestra la relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en la capa media. Se observa la poca influencia que presenta el tejido conductivo en la cepa y la basa, tanto con esfuerzos radiales como tangenciales. Al igual que en el espesor total, los contenidos de parénquima y de células de fibra son responsables en igual magnitud de los valores de esfuerzos radiales y tangenciales en la capa media del material, lo que se debe a que en esta capa dichas células se encuentran distribuidas en igual proporción.

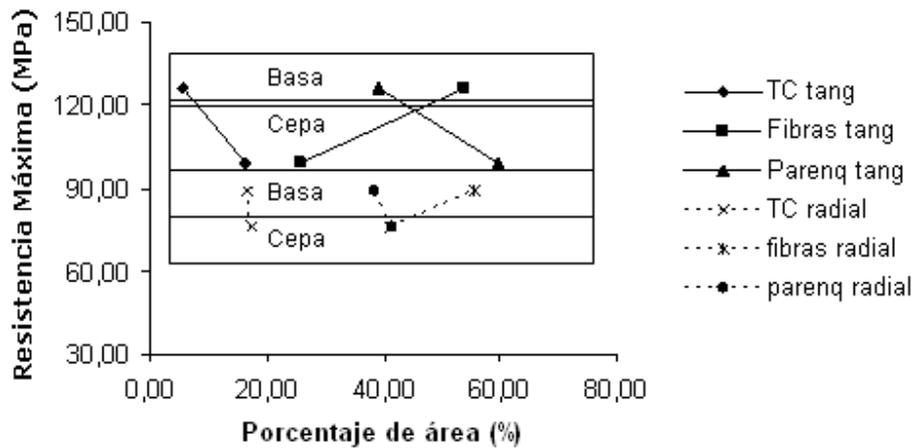


Figura 56 Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa media

La Figura 57, muestra la relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en la capa interna. Las células de parénquima son las mayores responsables en los valores de las resistencias radiales y tangenciales, aspecto que se debe a que esta capa esta conformada en su estructura interna principalmente por estas células.

Se observa además que los porcentajes de parénquima requeridos para llegar a obtener esfuerzos similares en la cepa como en la basa, no difieren significativamente.

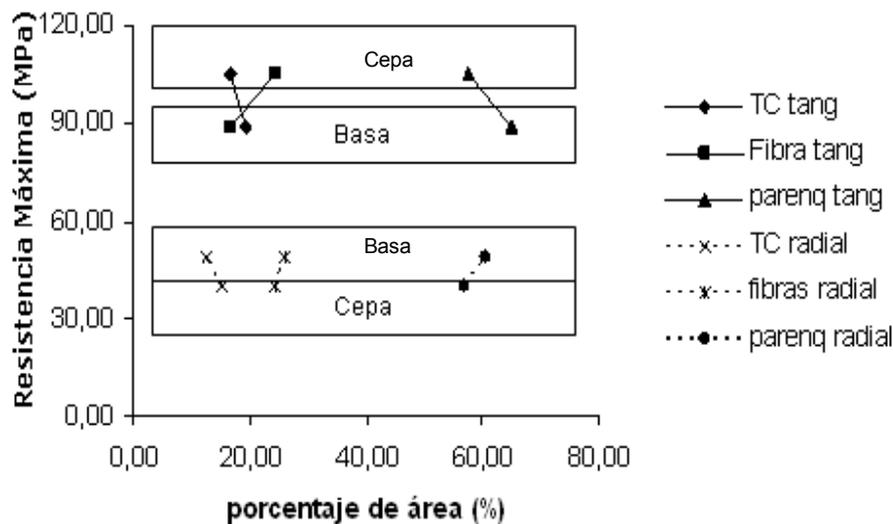


Figura 57. Relación de la resistencia máxima a flexión en la capa interna

Las Figuras 55, 56 y 57, en resumen muestran que la resistencia a la flexión en cada una de las capas analizadas disminuye de la capa

externa a la interna, y de la zona de menor espesor de pared a la de mayor, es decir en la basa hacia la cepa, cuya disminución es directamente proporcional a la disminución de las fibras y al incremento de las células de parénquima, lo cual coincide con lo reportado por Hidalgo (2003).

La Tabla 27, muestra tendencias del comportamiento de las resistencias radiales y tangenciales con la estructura interna en las capas externas medias e internas de la GAK. Con un nivel de confianza del 95%, los modelos encontrados se pueden utilizar para predecir los valores de esfuerzos en cada una de las capas analizadas, dentro de los rangos reportados a nivel de la cepa y la basa. Estas tendencias encontradas coinciden con los análisis realizados, que partieron de las relaciones mostradas de las Figuras 60 a la 62.

Tabla 27. Tendencias para determinación de las resistencias en función de la estructura interna en las capas.

	Capa	Modelos más ajustados	R <sup>2</sup>	Valor de P
<b>Cepa Radial</b>	Externa	$Esf(MPa) \approx 66,0736 + 0,3093 \text{ fibra}(\%)$	0,92	0,042
	Media	$Esf(MPa) \approx 80,823 + 0,1678 * \text{Parenquima}(\%)$	0,96	0,017
	Interna	$Esf(MPa) \approx 94,4374 - 0,385552 * \text{fibra}(\%)$	0,99	0,002
<b>Basa Radial</b>	Externa	$Esf(MPa) \approx 22,0935 + 3,06556 * \text{fibra}(\%)$	0,93	0,032
	Media	$Esf(MPa) \approx 88,3686 + 0,190951 * \text{fibra}(\%)$	0,99	0,003
	Interna	$Esf(MPa) \approx 64,2357 + 0,402281 * \text{parenquima}(\%)$	0,90	0,009
<b>Cepa Tangencial</b>	Externa	$Esf(MPa) \approx -0,753807 + 3,00205 * \text{Fibras}(\%)$	0,97	0,018
	Media	$Esf(MPa) \approx 86,9575 + 0,296619 * \text{Fibras}(\%)$	0,96	0,042
	Interna	$Esf(MPa) \approx 13,2801 + 0,4829 * \text{Parenquima}(\%)$	0,98	0,020
<b>Basa Tangencial</b>	Externa	$Esf(MPa) \approx 36,7638 + 2,82944 * \text{fibra}(\%)$	0,83	0,093
	Media	$Esf(MPa) \approx 52,33 + 0,6602 * \text{fibra}(\%)$	0,87	0,002
	Interna	$Esf(MPa) \approx 23,304 + 0,3214 * \text{fibra}(\%)$	94,4	0,003

La Tabla 28, da a conocer los valores de las resistencias radiales máximas al 10 y 13% de humedad, en cada una de las capas analizadas así como en el espesor total, en la cepa y basa. Se encontró que las resistencias radiales máximas con contenidos de humedad del 13% son mayores que los del 10%, en todas las capas analizadas, tanto

en la basa como en la cepa, además, que la capa externa es la que mayores valores presenta comparada con las demás.

El material tanto en la cepa como en la basa, con contenidos de humedad del 13%, estadísticamente son superiores a los del 10%, debido a que el material con mayor contenido de agua libre cuando se somete a flexión, puede obtener mayores deformaciones, comportándose más como un material plástico, a diferencia que cuando se tiene menores contenidos de humedad, cuyo comportamiento se asemeja más a un material elástico. Este comportamiento coincide con el reportado por Gonzalez et al. (2003) y por Chung et al. (2003).

Tabla 28. Resistencias tangenciales máximos en la basa y la cepa al 10 y 13% de humedad

	Resistencias Radiales en la cepa (MPa)				Resistencias Radiales en la basa (MPa)			
	Cepa Sin Nudo 10%	Cepa Sin Nudo 13%	Cepa Con Nudo 10%	Cepa Con Nudo 13%	Basa Sin Nudo 10%	Basa Sin Nudo 13%	Basa Con Nudo 10%	Basa Con Nudo 13%
<b>Total</b>	26,1	167,12	24,38	133,17	58,48	167,12	36,31	133,17
<b>Externa</b>	160,64	242,98	168,57	266,55	167,72	242,98	172,25	266,55
<b>Media</b>	25,46	126,14	25,58	132,9	32,95	126,14	33,11	132,9
<b>Interna</b>	23,9	102,4	24,29	106,14	29,22	102,4	32,89	106,14

La Tabla 29, da a conocer los valores de resistencias tangenciales máximas al 10 y 13% de humedad, en cada una de las capas analizadas así como en el espesor total, en la cepa y basa. Se encontró que el comportamiento en cada una de las capas y del espesor total del material, es similar cuando se someten a esfuerzos radiales, en cuanto a que las resistencias con contenidos de humedad del 13% son mayores que los del 10%, en todas las capas analizadas tanto en la basa como en la cepa, además, que la capa externa es la que mayores valores presenta comparada con las demás.

Tabla 29. Resistencias radiales máximos en la basa y la cepa al 10 y 13% de humedad

	Resistencias tangenciales en la cepa (MPa)				Resistencias tangenciales en la basa (MPa)			
	Cepa Sin Nudo 10%	Cepa Sin Nudo 13%	Cepa Con Nudo 10%	Cepa Con Nudo 13%	Basa Sin Nudo 10%	Basa Sin Nudo 13%	Basa Con Nudo 10%	Basa Con Nudo 13%
<b>Total</b>	23,8	78,03	24,09	53,15	51,80	161,29	46,61	122,92
<b>Externa</b>	82,75	172,91	109,2	274,64	87,75	212,09	140,74	254,38
<b>Media</b>	22,39	76,44	23,95	78,79	32,64	89,04	33,41	92,49
<b>Interna</b>	23,38	40,75	23,81	60,28	25,43	42,70	28,82	74,50

Los resultados de las Tablas 28 y 29, muestran el alto grado de anisotropía del material, en donde las resistencias difieren significativamente cuando se someten radial o tangencialmente, además, de la fuerte influencia del contenido de humedad en la resistencia de estos.

Aunque los resultados anteriores, muestran que el contenido de humedad y la ausencia o presencia de nudos inciden en la resistencia máxima, los resultados obtenidos bajo un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, a nivel de la basa del elemento en el espesor total bajo resistencias radiales y tangenciales, fortalece lo descrito con antelación.

Se encontró que el sentido (tangencial y radial), las zonas (Externa, media, interna), nudo (sin nudo o con nudo) y partes (basa y cepa) resultaron significativos ( $P < 0,05$ ) (Ver Tabla 6, Anexo A), se concluye que cada uno de estos factores afecta el esfuerzo máximo, aspecto que corrobora los resultados encontrados con antelación. Las interacciones no son significativas ( $P > 0,05$ ), en la interacción de los factores humedad\* presencia de nudos resultado que se considera lógico, dentro del comportamiento del material, ya que la propiedad física como es el porcentaje de humedad no incide en una propiedad intrínseca del material como es la ausencia o presencia de nudos que es característico de este.

En la Tabla 30 se presenta los intervalos múltiples de Duncan. La zona externa es la que presenta mayor resistencia máxima (hay diferencia significativa entre cada zona), de igual manera las probetas con nudo, las probetas extraídas de la basa, el sentido tangencial y las probetas evaluadas a 13% de humedad presentan mayor esfuerzo máximo.

Tabla 30. Intervalos múltiples de Duncan la resistencia máxima.

<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Zona</b>
A	142,78	140,69	144,87	64	<i>Externa</i>
B	64,960	62,87	67,05	64	<i>Media</i>
C	51,27	49,19	53,36	64	<i>Interna</i>
<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Nudos</b>
A	91,59	89,89	93,30	96	<i>Si</i>
B	81,08	79,37	82,79	96	<i>No</i>
<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Humedad (%)</b>
A	142,14	140,43	143,85	96	<i>13</i>
B	30,53	28,82	32,24	96	<i>10</i>

<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	90,99	89,29	92,71	96	<i>Basa</i>
B	81,68	79,97	83,39	96	<i>Cepa</i>
<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Sentido</b>
A	96,46	94,76	98,18	96	<i>Tangencial</i>
B	76,214	74,51	77,92	96	<i>Radial</i>

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

La Figura 58, da a conocer los valores de los módulos de elasticidad (MOE), del material sometido a resistencias radiales y tangenciales a un contenido de humedad del 10%, tanto en la cepa como en la basa con la presencia y ausencia de nudo. Se encontró que el módulo de elasticidad bajo esfuerzos radiales, son menores que los tangenciales, además, el MOE en el material con nudo es menor que el que no presentan nudo, comportamiento que se debe a lo frágil del material cuando presenta nudo y lo dúctil en ausencia del mismo.

Los mayores valores de módulo de elasticidad tanto en la cepa como en la basa se encuentran en el espesor total y van disminuyendo de la capa externa a la interna, aspecto que se debe no solo a la concentración de las células de fibras sino a que la longitud y espesor de estas que van disminuyendo hacia la capa interna, las cuales correlacionan positivamente con el MOE, y que coincide con lo reportado por Abd Latif (1990).

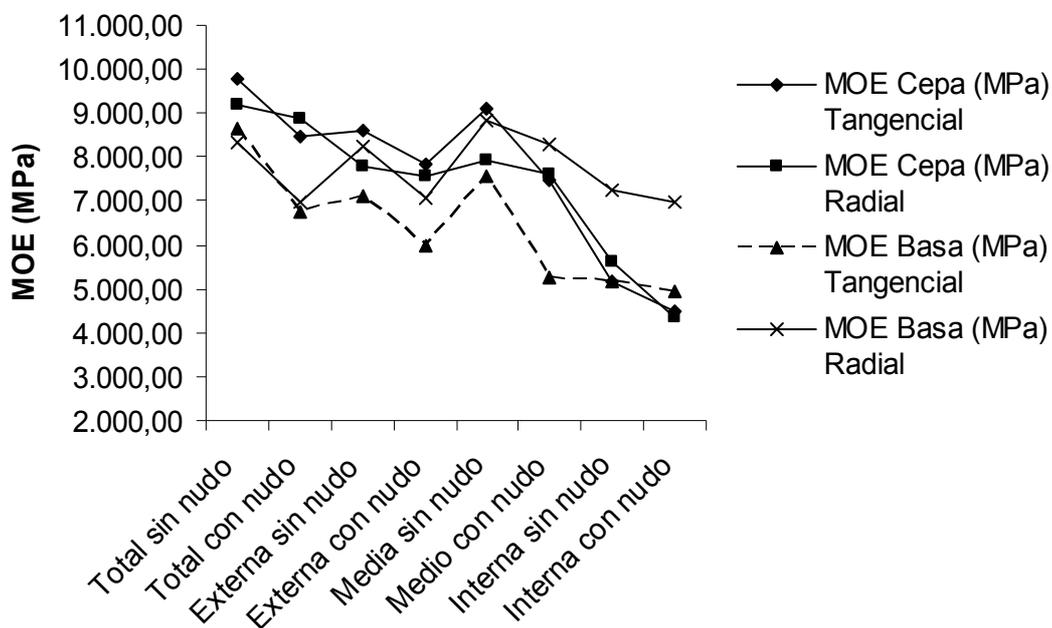


Figura 58. Módulos de elasticidad con la presencia y ausencia de nudos en la cepa bajo cargas radiales y tangenciales.

Estos resultados comparados con los encontrados por Ahmad (2000), sometiendo de igual manera el espesor total a esfuerzos radiales y tangenciales, difieren en un 11,72 % en el material sin nudo y en un 8,34% en aquellos que contienen nudo, los cuales no se consideran muy alejados, si se tiene en cuenta que estos análisis son comparados con los del Bambú calcuta.

Los valores de módulos de elasticidad del espesor total se encuentran dentro del promedio encontrados por Osorio et al. (2005), López y Cheatele (2002) y González et al (2003).

### 4.3.3 Resistencia a tensión

La Figura 59 presenta un aumento entre la basa y la cepa en la resistencia máxima, las probetas sin presencia de nudo presentan mayor resistencia máxima, aspecto que coincide con lo reportado por Zen Li Zhou (1992) citado por Hidalgo (2003), y por Ahmad (2000).

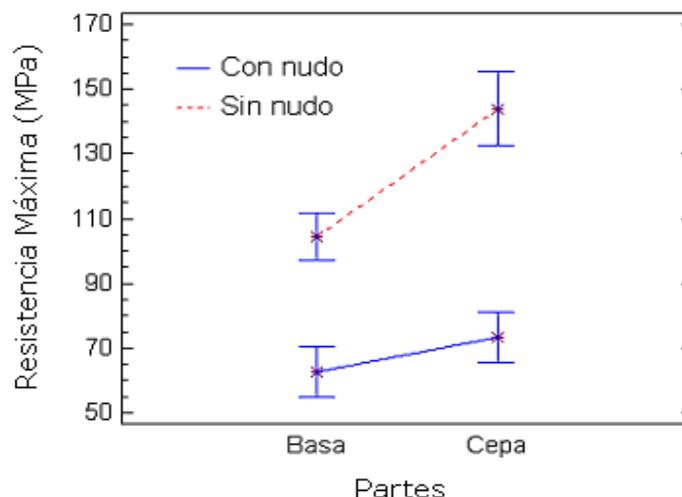


Figura 59. Resistencia máxima a tensión

La Tabla 31, da a conocer los valores de intervalos de Duncan para la resistencia máxima de las probetas sometidas a tensión.. La zona total es la que presenta mayor resistencia máxima, existiendo diferencias significativas con la zona interna y no con las demás capas, y de igual manera las probetas sin nudo y extraídas de la cepa, presentan mayor resistencia máxima.

Los valores de resistencia promedios encontrados, se encuentran en los rangos de confianza de los valores encontrados por otros investigadores, como López y Cheatle (2000) y Ciro et,al (2005) en GAK, así como dentro del rango de valores de esfuerzos con otros tipos de bambúes como los reportados por Amada et al. (2001) y Ahmad (2000) bambú *Phyllostachys edulis* y Bambu Calcuta, lo que muestra la heterogeneidad del material aún cuando se somete a esfuerzos de tensión.

Tabla 31. Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia máxima.

Grupos	Resistencia Máxima Media (Mpa)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Zona
A	155,42	139,67	171,16	10	Total
B	89,89	78,94	100,84	12	Media

B	79,81	68,86	90,75	12	Externa
C	58,94	48,70	69,18	14	Interna

<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máximo Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Nudos</b>
A	124,15	114,75	133,54	24	No
B	67,89	60,14	75,62	24	Si
<b>Grupos</b>	<b>Resistencia Máxima Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	108,62	98,92	118,33	22	Cepa
B	83,41	75,92	90,89	26	Basa

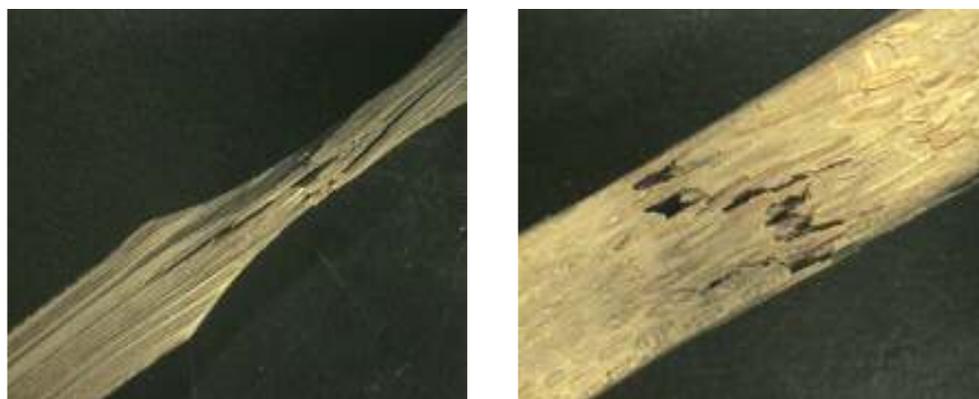
Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

Al igual que en los ensayos a flexión, la disminución de la resistencia en el material con nudo se debe principalmente a la discontinuidad de las fibras entre el entrenudo y el nudo, convirtiéndose de esta manera el nudo, en un punto de baja resistencia, aspecto también denotado por Liese (1998), ocasionando que la probeta falle súbitamente en el nudo y se comporte como un material frágil, mientras que en las probetas sin nudo se presenta un agrietamiento a lo largo de la probeta que ocasiona la falla del material (ver Figura 60)

Las fallas tanto en el nudo como en el entrenudo se producen por la ruptura de las células fibra y posteriormente de parénquima, coincidiendo con lo denotado por Amada et al. (2001), quien denomina este fenómeno como "primera falla de las fibras" o FRP, cuyo comportamiento se da en otros materiales compuestos como los reforzados con plásticos.



Probetas con nudo



Probetas sin nudo

Figura 60. Fallas en el nudo y entrenudo bajo esfuerzos de tensión

La Figura 61, muestra la relación de la resistencia a tensión con la estructura interna del material en el espesor total. Se observa que tanto el tejido conductivo como las células de parénquima, presentan menor incidencia que el porcentaje de fibras en los valores de resistencia a tensión. Esta afirmación de que el porcentaje de fibra es el que mayor incidencia presenta en la resistencia del material, coincide con lo descrito por Nogata et al. (1995) citados por Hidalgo (2003) y por Amada et al. (2001), quien concluyó que la fractura del material expuesto a esfuerzos de tensión depende solamente de la fracción volumétrica de las fibras.

Las características geométricas y de forma de las fibras, hacen que estas adquieran una alta resistencia a la tensión, según Ghavami (1981) y Moreno et al. (2004), lo que permite que dicha resistencia se refleje finalmente en la resistencia del material.

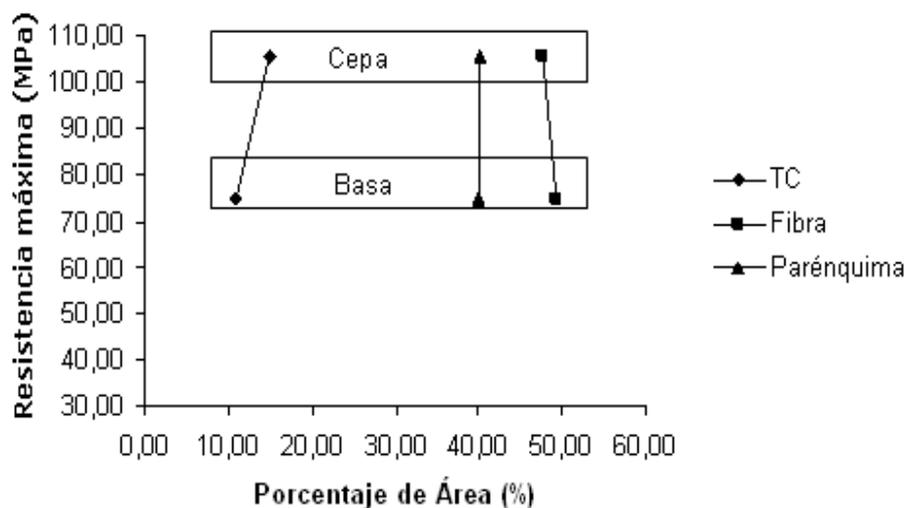


Figura 61. Relación del esfuerzo a tensión con la estructura interna en el espesor total

La Tabla 32, muestra tendencias del comportamiento de la resistencia a tensión con la estructura interna en el espesor total de la GAK. Con un nivel de confianza del 95%, las tendencias encontradas se pueden utilizar para predecir los valores de la resistencia en el espesor total, dentro de los rangos reportados a nivel de la cepa y la basa. Estas tendencias coinciden con el análisis realizado con antelación a partir de la Figura 67.

Tabla 32. Tendencias para determinación de la resistencia máxima a tensión en el espesor total en función de la estructura interna

	Tendencias más ajustados	R <sup>2</sup>	Valor de P
<b>Basa</b>	$Esf(MPa) \approx -51,64 + 2,564 * fibra$	0,94	0,022
<b>Cepa</b>	$Esf(MPa) \approx 50,17 + 1,6443 * fibra(\%)$	0,96	0,003

La Figura 62 da a conocer los valores de resistencia máxima a tensión de cada una de las capas estudiadas. Al igual que en el espesor total, se encontró que la resistencia en cada una de las capas son mayores en la cepa que en la basa, siendo también mayores en las probetas sin nudo que con nudo.

La resistencia a tensión en la GAK aumenta de la zona interna a la externa, aspecto que coincide con lo reportado por Nogata et.al (1995) citado por Hidalgo (2003), al realizar ensayos en *Phyllostachys pubescens*, lo que puede deberse a que las células de fibra aumentan en

espesor y en longitud de la zona interna a la externa, y que hacen que los haces vasculares sean más resistentes en las zonas externas que en las internas de acuerdo a M.C Yeh (1995), reflejando finalmente dicha resistencia en cada una de las capas.

Otro aspecto que parece incidir directamente en la resistencia a la tensión en cada una de las capas analizadas y que se comparte con Murphy (1992), es la estructura polilaminar de las células de fibra, las cuales presentan diferentes números de capas de acuerdo a la zona en que se presente, a la edad y a la especie.

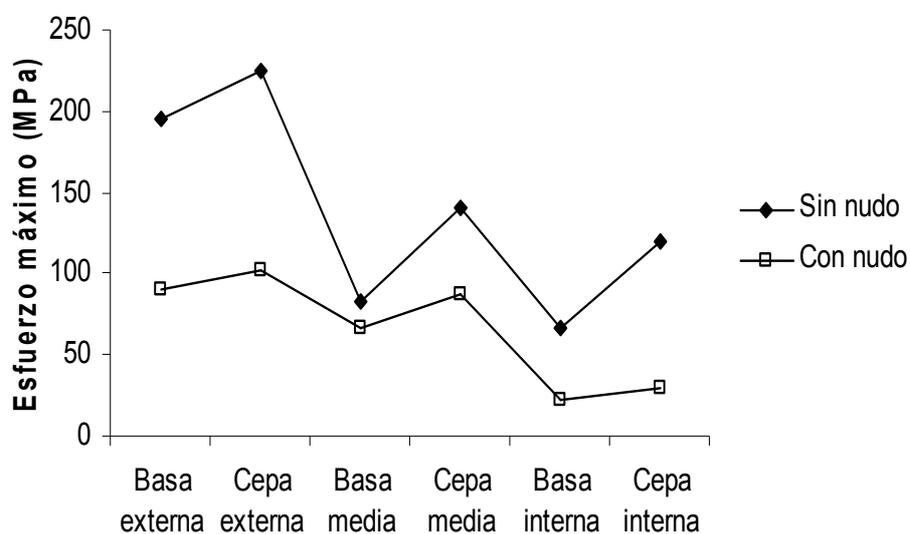


Figura 62. Esfuerzos máximos a tensión en las capas

Las Figuras 63, 64 y 65, dan a conocer la relación existente entre las capas externas, medias e internas con la estructura interna del material. En las capas externas y medias, al igual que en el espesor total se encontró que el porcentaje de fibras es el mayor responsable de la resistencia de cada capa identificada. En la capa interna a pesar de que se observa que existe un mayor porcentaje de parénquima, esta célula por presentar una estructura débil, ejercen poca resistencia en la matriz y son los haces vasculares compuestos por células de fibras los que ejercen mayor incidencia en la resistencia del material.

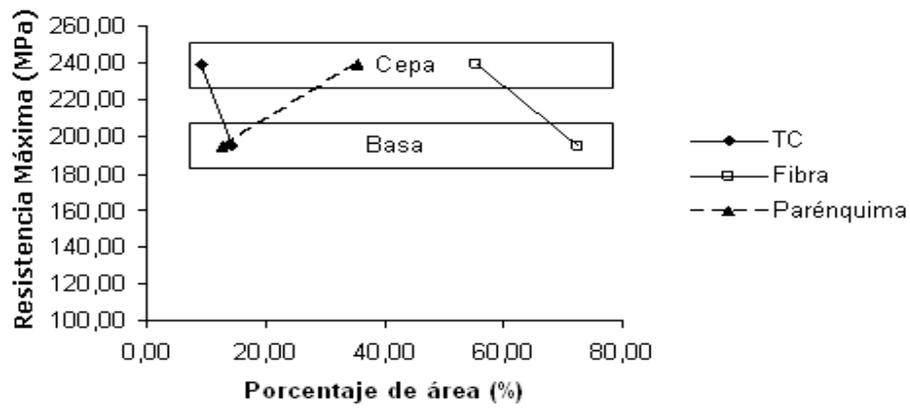


Figura 63. Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa externa

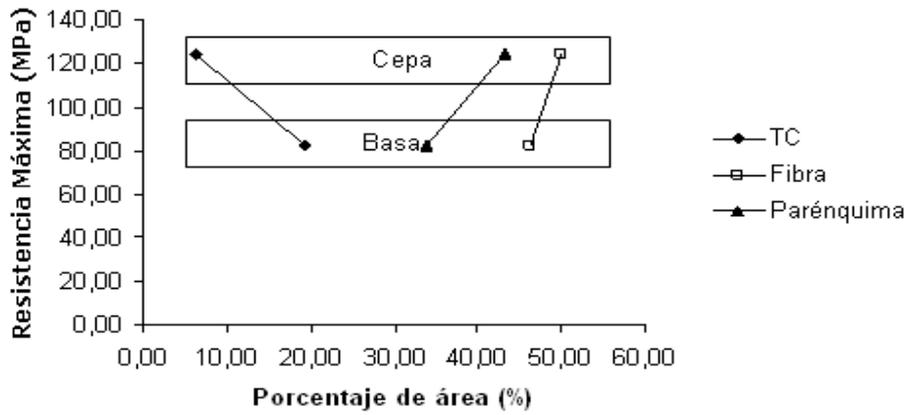


Figura 64. Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa media

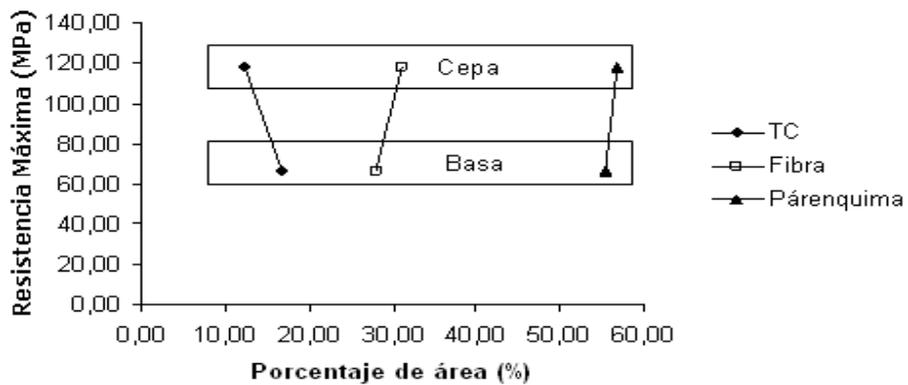


Figura 65. Relación de la resistencia con la estructura interna en la capa interna

La Tabla 33, muestra tendencias del comportamiento de la resistencia a tensión con la estructura interna en cada capa de la GAK. Con un nivel de confianza del 95%, las tendencias encontradas se pueden utilizar para predecir los valores de resistencia en cada una de las capas identificadas, dentro de los rangos reportados a nivel de la cepa y la basa. Estas tendencias encontradas coinciden con el análisis realizado con antelación a partir de las Figura 64 a la 66.

Tabla 33. Tendencias para determinación de la resistencia máxima a tensión en las capas en función de la estructura interna.

	Tendencias más ajustados	R <sup>2</sup>	Valor de P
<b>Basa externa</b>	$Esf(MPa) \approx -1892,1 + 28,832 * fibra(\%)$	0,96	0,003
<b>Cepa externa</b>	$Esf(MPa) \approx 7,4055 + 4,1773 * fibra(\%)$	0,93	0,023
<b>Basa media</b>	$Esf(MPa) \approx 35,778 + 1,0041 * fibra(\%)$	0,98	0,002
<b>Cepa media</b>	$Esf(MPa) \approx 10,878 + 0,2651 * fibra(\%)$	0,94	0,005
<b>Basa interna</b>	$Esf(MPa) \approx -39,442 + 3,7609 * fibra(\%)$	0,92	0,003
<b>Cepa interna</b>	$Esf(MPa) \approx 16,724 + 0,1215 * fibra(\%)$	0,93	0,003

La Figura 66, muestra un decrecimiento entre el módulo elástico de la Basa a la Cepa e igualmente las probetas sin nudo presentan mayor módulo elástico.

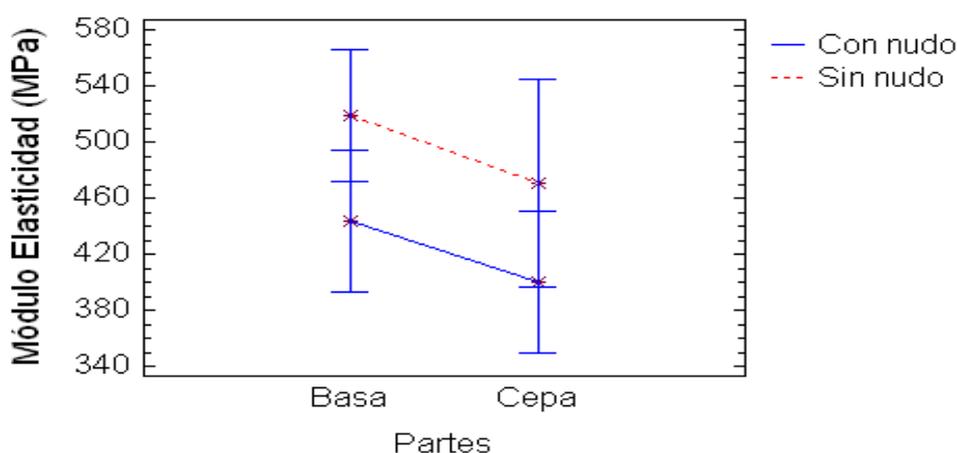


Figura 66. Módulos de elasticidad a tensión en las capas

Un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, se presenta en la Tabla 34, en esta se observa que el único factor significativo son las zonas ( $P < 0,05$ ), esto nos indica que el valor del módulo elástico es afectado por las capas de las probetas.

Tabla 34. Análisis de varianza para módulo elástico a tensión (MPa).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Nudo	1	52256,3	52256,3	3,52	0,0689
Partes	1	20008,6	20008,6	1,35	0,2534
zonas	3	6,70E+06	2,23E+06	150,45	<0,0001
Nudo*Partes	1	49,7983	49,7983	0	0,9541
Nudo*zonas	3	34307	11435,7	0,77	0,5182
Partes*zonas	3	26569,4	8856,45	0,6	0,6213
Error	35	519307	14837,3		
Total	47	1,03E+07			

Número de observaciones 48  
(1,8302)

$R^2 = 0,9496$

Durbin Watson mayor que 1,4

la Tabla 35 da a conocer los valores de módulo de elasticidad MOE, para el espesor total y cada una de las capas identificadas, los nudos y las partes de la guadua de donde se tomaron las probetas. Se encontró que el modulo de elasticidad es máximo para espesor total, mientras que la capa media y externa no presentan diferencia significativa. Este comportamiento del MOE, coincide con el reportado por Nogata et al. (1995) citado por Hidalgo (2003), cuyo aspecto se debe a que estas capas presentan mayor deformación unitaria dado el espesor de sus paredes. Al comparar los valores de MOE entre la capa externa e interna, se observa que la capa interna alcanza mayores deformaciones unitarias que la externa, lo que se debe no solamente al mayor contenido de fibras, sino a la longitud y espesor de dichas células, aspecto que es acorde con lo reportado por Abd Latif (1990).

Tabla 35. Intervalos múltiples de Duncan para Módulos de elasticidad (Mpa).

Grupos	Esfuerzo Máximo Media (Mpa)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Zona

A	1187,97	1085,31	1290,63	10	Total
B	540,04	473,27	606,82	14	Interna
C	58,43	-12,95	129,82	12	Externa
C	45,95	-25,43	117,34	12	Media
<b>Grupos</b>	<b>Esfuerzo Máximo Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Nudos</b>
A	494,78	433,55	556,01	24	No
B	421,42	370,94	471,89	24	Si
<b>Grupos</b>	<b>Esfuerzo Máximo Media (MPa)</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Partes</b>
A	481,13	432,29	529,97	26	Basa
A	435,06	371,77	498,36	22	Cepa

Promedios con letras diferentes, en cada fila, son estadísticamente diferentes según la prueba rangos múltiples de Duncan ( $P < 0,05$ )

#### 4.2.4 Relación de Poisson ( $\nu$ )

La Figura 67, da a conocer los resultados obtenidos de la relación de Poisson en el espesor total del material y en cada una de las capas que lo componen, en la cepa y la basa. La relación de Poisson tanto en la cepa como en la basa alcanza los mayores valores en la capa media y en el espesor total, y los menores en la capa externa.

Se encontró que los valores de Poisson son significativamente superiores en la basa con respecto a la cepa tanto en el espesor total como en cada una de las capas analizadas, resultado que a partir de pruebas DUNCAN se fortalece al encontrar valores de  $p$  de 0,003. Lo anterior es debido a que en la basa existe un mayor porcentaje de fibras y menor de parénquima, lo que le permite una menor deformación lateral al material en relación con la cepa cuando es sometido a cargas.

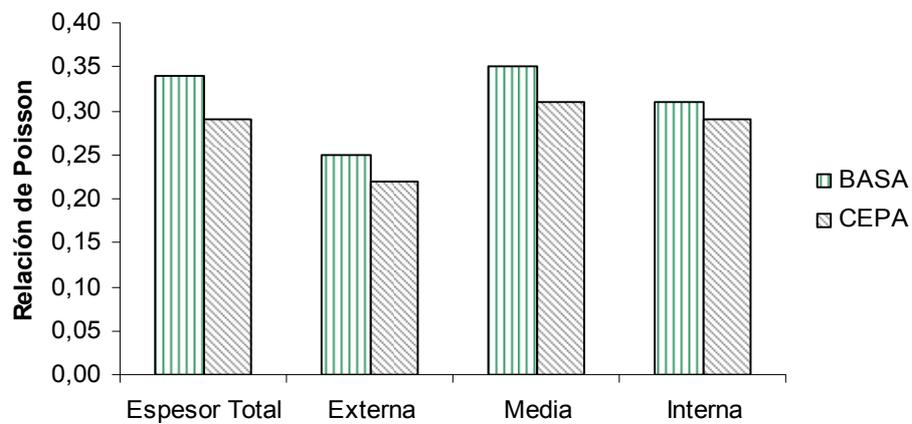


Figura 67. Relación de Poisson para la basa y la cepa del elemento en cada una de las zonas

La Figura 68, muestra el análisis de LSD para la relación de Poisson para la cepa y la basa. Se encontró que tanto en la basa como en la cepa la relación de Poisson difiere significativamente con los valores encontrados entre la capa externa y la interna, y entre la capa interna y la media, pero no existe una diferencia significativa entre la capa media e interna y el espesor total.

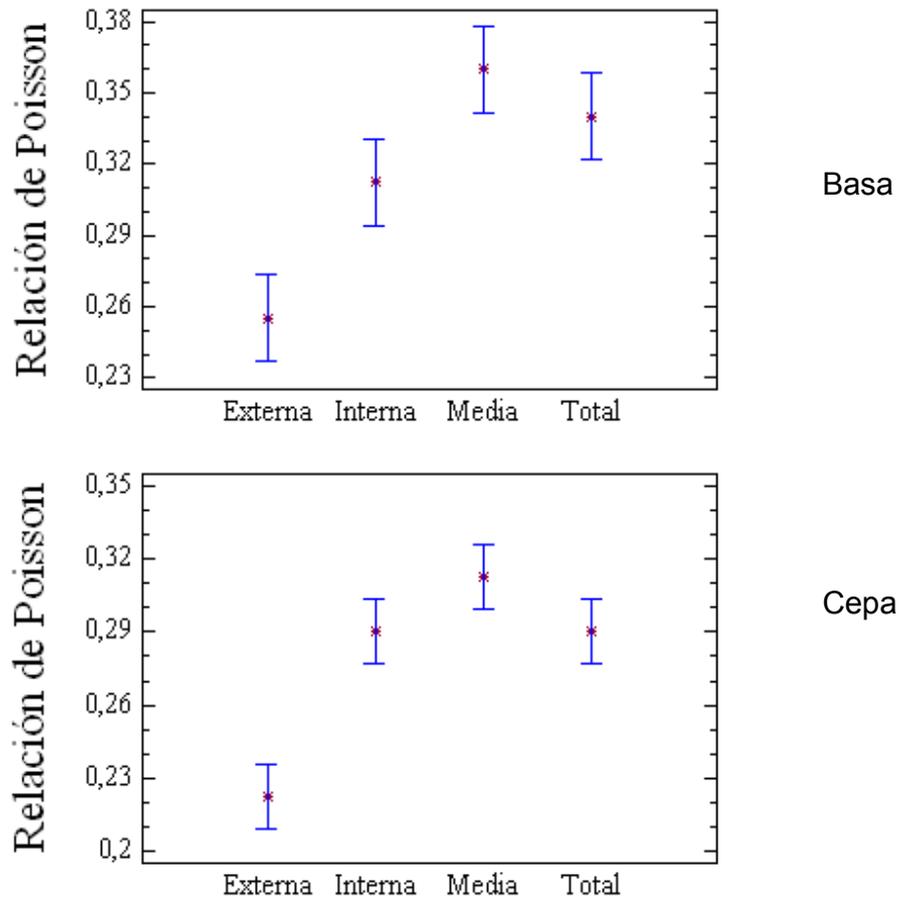


Figura 68. Análisis LSD para la relación de Poisson en la cepa y la basa

La Figura 69, muestra una comparación de la relación de Poisson con otros materiales. Se observa que los valores en GAK, son muy diferentes frente a otras maderas como son el pino y el roble, aspecto que se debe al grado de flexibilidad que imprime la matriz fibra-parénquima en la GAK, ya que la distribución de las fibras en las otras especies son radiales y tangenciales, mientras que en la guadua la disposición de las fibras es en sentido longitudinal, es decir paralelo al culmo o tallo, lo que permite una mayor deformación lateral al igual que otros materiales metálicos como el aluminio y el platino e incluso el acero, aspecto que permite generar investigaciones de estructuras de concreto reforzadas con guadua.

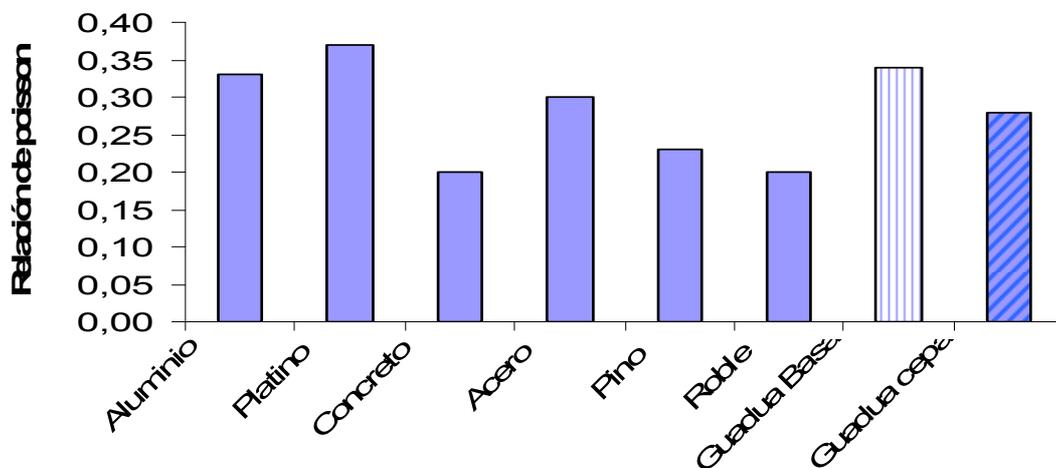


Figura 69. Comparación de la relación de Poisson de la Guadua con otros materiales (Gere, j; 2001)

La Figura 70, muestra el comportamiento de la relación de Poisson con la estructura interna. Se observa en todas las capas analizadas y en el espesor total que el tejido conductivo presente en menor porcentaje, no presenta mucha influencia en los valores de la relación de Poisson.

En la capa total y media, el porcentaje de fibras y de parénquima inciden muy similarmente en la relación de Poisson, en donde el porcentaje de fibras tiende a rigidizar el material y permite menores deformaciones laterales, mientras el de parénquima da lugar a mayores.

Lo anterior hace que los valores de Poisson en estas capas no difieran mucho, ya que en la capa total cuando se somete a esfuerzos de compresión, la mayor área que presenta contacto con la carga en dirección axial, es la capa media.

En la zona externa, el porcentaje de fibras actúa en mayor porcentaje en la relación de Poisson, comparado con el parénquima y el tejido conductivo, lo que permite una menor deformación lateral, dando lugar a que en esta capa se obtengan menores valores que en las otras capas.

La capa interna se encuentra influenciada en mayor porcentaje por las células de parénquima, aspecto que se considera lógico, ya que en esta capa es el tipo de células que mayor área ocupa, y permiten mayores deformaciones laterales.

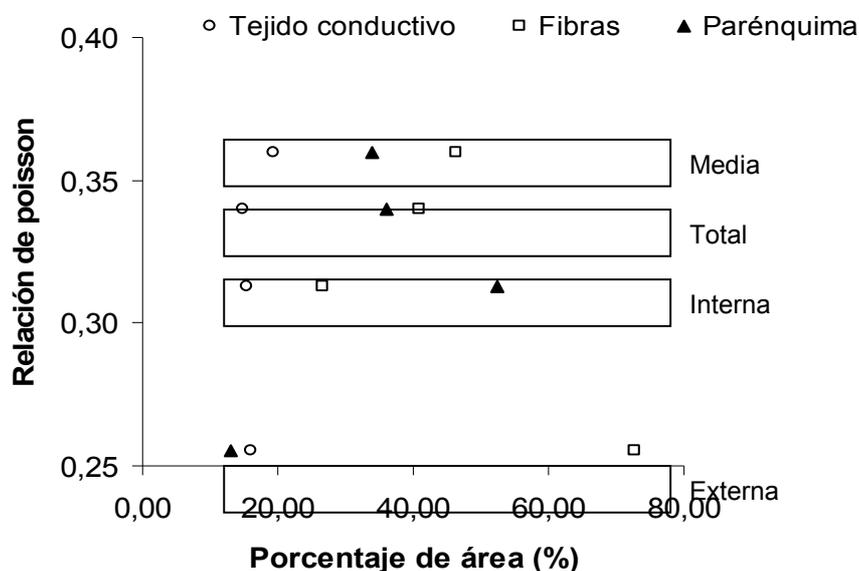


Figura 70. Relación de Poisson con la estructura interna en las capas a nivel de la basa

La Tabla 36, muestra las tendencias más aproximados encontrados con un nivel de confianza del 95%, aplicado a cada capa de la basa y al espesor total. Los modelos encontrados fortalecen los resultados dados a conocer a partir de la Figura 66, y pueden ser utilizados para determinar la tendencia de los valores de la relación de Poisson con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 36. Tendencias para determinación de la Relación de Poisson en función de la estructura interna en la basa.

Capa	Tendencias más ajustados	R <sup>2</sup>	Valor de P
Total	$\nu \approx 0,0318198 - 0,000903524 * fibra + 0,009391 * parenquima$	0,98	0,032
Externa	$\nu \approx 0,365623 - 0,00856 * parénquima$	0,89	0,048
Media	$\nu \approx 1,2700 - 0,020687 * fibra + 0,000904115 * parnquima$	0,94	0,035
Interna	$\nu \approx 1,41926 - 0,040533 * fibra$	0,92	0,041

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, en el cual se estudió la estructura interna de la GAK forma cebolla, obtenida en el municipio de Cocorná, Antioquia, y con una edad de 5 años, se puede concluir que:

- La estructura interna de la GAK, presenta una conformación similar comparada con otros tipos de bambúes, presentándose solamente diferencias significativas en los porcentajes de parénquima, tejido conductivo y fibra en cada una de las capas analizadas.
- La distribución de los componentes de la estructura interna tanto en la cepa como en la basa es la siguiente: Las fibras disminuyen de la capa externa a la interna, mientras que las células de parénquima se comportan de manera contraria, y el tejido conductivo se mantiene casi constante a través del espesor total.
- Al realizar análisis de varianza y pruebas Duncan con un intervalo de confianza del 95%, se obtuvo que La cantidad de parénquima, haces vasculares, tejido conductivo y de fibras en el espesor total de la pared, dependen significativamente de la zona (Capa externa, media e interna), y de la parte (basa y cepa) analizada.
- Un análisis de varianza y una prueba Duncan con un nivel de confianza del 95%, mostraron que la longitud promedio de las células de fibra se ve afectada únicamente por la zona (externa, media e interna), pero no se presentó diferencia significativa entre la zona externa y media. Los valores medios encontrados de la longitud de la fibra no presentaron mucha dispersión de los encontrados por Liese (1998), el cual reportó para la GAK valores de 1,6 mm, que coinciden con los encontrados en la zona interna tanto de la cepa como de la basa.
- Las células de las fibras de la GAK, al igual que otros bambúes parece presentar una estructura polilaminar axial, de acuerdo a la clasificación de Anne et al (1998) para fibras de madera y que coincide con la reportada por Liese (1998) para otros bambúes.

- La densidad de la GAK, de acuerdo un análisis de varianza, se ve afectada por la zona, la parte (basa y cepa) y por la presencia o ausencia de nudos. Sin embargo, a partir de una prueba Duncan, se encontró que la densidad presentó diferencias significativas en la zona de estudio, obteniendo los mayores valores en la capa externa, pero además no se encontró diferencias significativas entre las partes ni con la presencia o ausencia de nudos.
- Los valores de densidad en cada una de las capas analizadas como en el espesor total se ven influenciados principalmente por los contenidos de células de fibra.
- Un análisis de varianza y una prueba Duncan con un intervalo de confianza del 95%, mostraron que la resistencia a la flexión se ve afectada por la zona, por la parte, por la presencia de nudos, por la dirección de aplicación de la carga y por el contenido de humedad, presentándose diferencias significativas en cada uno de los valores obtenidos bajo la influencia de dichas variables.
- La resistencia a la flexión de la Guadua tanto en sentido radial como tangencial, dependen principalmente de los porcentajes de fibra en la capa externa, y tanto de los porcentajes de fibra como de parénquima en igual magnitud en las demás capas analizadas incluyendo el espesor total.
- Se encontró que el módulo de elasticidad en la resistencia radial fue menor que en la tangencial, además, el MOE en el material con nudo es menor que el que no presentan nudo, comportamiento que se debe a lo frágil del material cuando presenta nudo y lo dúctil en ausencia del mismo.
- Al igual que en la resistencia a flexión, una prueba Duncan con un intervalo de confianza del 95%, mostró que la resistencia a la tensión se ve afectada por la zona, por la parte y por la presencia de nudos, presentándose diferencias significativas en cada uno de los valores obtenidos bajo la influencia de dichas variables.
- La resistencia a la flexión de la GAK en todas las capas analizadas incluyendo el espesor total, dependen principalmente de la concentración de células de fibra.

- Las fallas a flexión radial y tangencial, así como a tensión, se producen en primera instancia por la ruptura de las células de fibra, lo que se denomina de acuerdo a Amada et al (2001), como primer rompimiento de las fibras.
- Los resultados encontrados de la relación de Poisson pueden ser utilizados como parámetros en el análisis de estructura o modelamiento del material, ya que de acuerdo a la literatura son los primeros datos reportados para GAK y estos no difieren en un más del 15% cuando se tienen resultados con materiales isotrópicos.
- La GAK, es un material compuesto, analizado no solamente desde su espesor total, sino desde cada una de las capas que lo componen, por tanto se dificultad encontrar modelos matemáticos para dicho material, ya que estos deben ser formulados desde la base de la teoría de la inelasticidad.

A partir de las conclusiones anteriores se recomienda los siguientes aspectos:

- Ensayar nuevas técnicas que permitan identificar con precisión la estructura polilaminar o multicapas de las células de fibra de la GAK.
- Adelantar investigaciones tendientes a analizar la variación del número de capas en las células de fibra de la GAK, en función de la edad del culmo, y correlacionar dicha variable con las propiedades mecánicas del material.
- Al seleccionar un material bajo esfuerzos de flexión o tensión, cuyo uso sea estructural o para la industria de laminados, se recomienda tener en cuenta el porcentaje de humedad y la presencia o ausencia de nudos, dada la incidencia de estos factores en los esfuerzos máximos.
- Dado la anisotropía del material, es pertinente adelantar estudios más precisos que permitan encontrar la relación de Poisson, teniendo en cuenta el comportamiento del mismo sometido a cargas en diferentes direcciones.

## BIBLIOGRAFÍA

ABD. LATIF ET AL. 1990. Anatomical features and mechanical properties of three Malaysian bamboos. *Journal Tropical Forest Science* 2(3): 227-234.

AGOPYAN, VAHAN. 1988. Vegetable fiber reinforced building materials developments in Brazil and other Latin American countries. En: *Vegetable fibre reinforced building materials*. p.202-242.

AHMAD MANSUR, A. 2000. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials. Trabajo de grado para optar al título de Doctor of Philosophy in Wood Science and Forest Products. Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg. 209p. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08212000-10440027/unrestricted> (consultada en enero 25 de 2005).

AMADA S; MUNEKATA T. y NAGASE. 1996. *J Composite materials*. 28B: 800-20.

AMADA S; UNTAO S. Fracture properties of bamboo. 2001. *Composites part B: Engineering*. 32:451-459.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D-1666. 1975. En: *Annual book of ASTM standars: designation Philadelphia*. p.459-485.

ANNE. M, BELAM. MULDER. 1998. The making of the architecture of the plant cell wall: How cells exploit geometry. *Proc Nat Adademy Sci, Plan Biology*. Vol.95, p 7215-7219.

ASKELAND, D.R. 1998. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Intarnational Thomsom Editores. Ciudad de México. 790 p.

BERALDO A.L. 1997. Compósitos biomassa vegetal cimento In: Toledo Filho R. D., Nascimento J. W. B., Ghavami K. (editores). Materiais não convencionais para construções rurais. Campina Grande, PB, Brasil, Cap.1, p 1-48.

BLEDZKI, A et al. 1997. Natural fiber reinforced plastics. En: Handbook of engineering polymer materials. Editado por Nicholas Cheremisinoff. N.Y. p 787-808

BRUCE. M, DAVID. 2003. Mathematical modelling of the cellular mechanics of plants. Phils trans Royal Society, London. P 1437-1444.

CALLISTER, W.D. 1994. Materials science and engineering: an introduction. John Wiley & Sons Editors, New York. 810 p.

CASTAÑO, Francisco; MORENO Rubén Darío. 2004. Guadua para todos "Cultivo y Aprovechamiento". CARDER. Pereira, Colombia. p.33.

CHEATLE, David; LOPEZ, Luis. 2002. Diseño de uniones y elementos en estructuras de guadua. Seminario - Taller Avances en la investigación sobre Guadua. Pereira, Colombia. P.15-32.

CHUNG, K.F; YU, W.K. 2002. Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings, Eng. Struc. 24, 429-442.

CIRO, H; OSORIO, J; VÉLEZ, J. 2005. Determinación de la resistencia mecánica de la guadua angustifolia kunth a tensión y cizalladura. Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín, Colombia. Vol.58, No.1.

GERE, JAMES. Mechanics of materials. Fifth edition, 2001. p 115-264.

GHAVAMI, K. 1981. Desenvolvimento alternativo para construção de habitação de baixo custo. Jornal debates sociais-pobreza e desenvolvimento, Rio de Janeiro, Brasil. Vol.27 No.52/53. p.119-132.

GHAVAMI, K; HOMBEECK, P. 1981. Aplicación de bamboo as a construcción material. Proc. Lat. AMER of building Appl. Low cost housing. Sao Paulo, Brasil. oct.28 p.

GONZÁLEZ C. Eugenia; OSORIO, J. 2003. Resistencia a la flexión de la Guadua angustifolia kunth a escala natural. Universidad Nacional de Colombia, Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, Colombia. Vol.55, No.2.

GONZÁLEZ, Eugenia y DIAZ, Jhon. 1992. Propiedades físicas y mecánicas de la guadua. Tesis Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín, Colombia. p 55-64.

GROSSER, D. & LIESE, W., 1971. On the anatomy of Asian bamboo with special reference to their vascular bundles. Wood Science and technology, 5: 290-312.

GUIMARAES, S.S. 1984. Experimental mixing and moulding with vegetable fiber reinforced cement composites. En: Proc. Int.Conf. Low cost and energy saving construction with material. Rio de Janeiro, Brasil. P.37-51.

HIDALGO L, ÓSCAR. 1974. Bambú, su cultivo y aplicaciones. . Estudios Técnicos Colombianos Ltda, Cali, Colombia. p 182-155.

HIDALGO, Oscar. 2003. Bamboo. The gift of the gods. O. Hidalgo (Ed.) Bogotá, Colombia. 553 p.

JANSSEN, JULES J. 2002. Building with bamboo a handbook. Holanda: Intermediate technology publications. Holanda. 245 p.

JUDZIEWICS, EMMET et al. 1999. American Bamboos, Smithsonian Institution Press, Washington. 187 p.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. 1984. Manual de diseño para maderas del grupo Andino. Lima, Perú: JUNAC. 287p.

KUMAR, S., SHUKLA K.S., DEV, T. & DOBRIYAL, P. 1994. Bamboo preservation techniques: a review. INBAR Technical report N° 20 International Network for Bamboo and Rattan & Indian Council of Forestry Research Education (ICFRE), New Delhi.

Li, Zeng Xiao. 1995. Anatomical analyses of native bamboo culms in China. Beijing , China. p.7-11.

LIESE, W. 1985. Bamboos-biology, silvics, properties utilitations. Dt Ges (GTZ), Nro 180.180 tz, Robdorft. 132 p.

LIESE, W. 1998. The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical report N° 18. Internacional Network for Bamboo and Rattan. Beijing, China. 204 p.

LO, Tommy; CUI, H. Z; LEUNG, H.C., 2004. The effect of fiber density on strengh capacity of bamboo. Materials letter, 58, 2595-2598.

LONDOÑO, X., RIAÑO, N.M. & CAMAYO, G.C. 2002. Estudio anatómico de los diferentes órganos de la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), con énfasis en el culmo. Corporación Regional Autónoma del Quindío – Sociedad Colombiana del Bambú – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – CENICAFE. Chinchiná, Colombia. 38p.

LÓPEZ MUÑOZ, L.F. & TRUJILLO CHEATLE, D. 2002. Diseño de Uniones y elementos en estructuras de Guadua. En: Seminario – Taller Avances en la investigación sobre Guadua. 2002. Pereira, Colombia.

M.C YEH. 1995. Vascular Bundle Arragement, an aid to Bamboo Recognition. American Bamboo Society, No.17, p.6-9.

MEJIA F. FERNANDO. 1985. Propiedades físicas y mecánicas de especies maderables en Caldas para su uso en la construcción. CINDEC; Manizales. p.43.

MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. McGraw-Hill, Ciudad de México. 996 p.

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. 1991.

MORENO LUIS, OSORIO LINA, TRUJILLO EFRAÍN. 2004. Caracterización físico química de la *Guadua angustifolia* kunth. Tesis Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 107p.

MORENO, RUBEN DARÍO. 2002 Actores del manejo Sostenible de la Guadua. CARDER, Pereira. 54 p.

MURPHY, R.J; ALVIN,K.L. 1992. Variation in fibre wall structure of bamboo. IAWA Bulletin, n.s, 13, 403-410.

NORMAS COPANT 555. 1973. Método de determinación de peso específico aparente, cizallamiento paralelo al grano, compresión, flexión estática. Buenos Aires, Argentina, p.1-15.

OSORIO, J. A.; CIRO, H.J.; VÉLEZ, J. Efectos de algunos parámetros físicos y geométricos en la resistencia de diseño a flexión de la *Guadua angustifolia kunth*. Revista DYNA No.145, p.37-44. 2005. Medellín, Colombia.

OSORIO, J. A.; CIRO, H.J.; VÉLEZ, J. Influencia de parámetros físicos en la resistencia de diseño a compresión de la *guadua angustifolia kunth*. En proceso de edición, Revista DYNA 2005. Medellín, Colombia.

PARAMESWARAN; LIESE, W. 1976. On the fine structure of bamboo fibres. Wood Science and Technology. 10, 231-246.

SAIZA, E.. 1998. Temas de divulgación de materiales de altas prestaciones: En revista de plásticos modernos. Vol.75 No. 501. p 250-256.

SERA, E.E. 1990. Natural fibers as reinforcement. En: Journal Ferrocement. Bangkok. Vol 2, No 2. p.109-124.

SHAFFER, J. et al. 2000. Ciencia y diseño de materiales en ingeniería. Primera edición. Compañía Editorial Continental. México.

SHAN SOMAYAJI. 1995. Civil engineering materials. Pretice Hall, p.310-317.

STEEL, R. G y TORRIE, J.H. Bioestadística: principios y procedimientos. Bogotá: McGraw Hill, 1985. 622 p.

THE INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. 1999. Inbar standart for determination of physical and mechanical properties of bamboo. INBAR.

TONG, J. REN, L.Q; CHEN B.C. 1995. Abrasive wear behavior of bamboo, Tribology International 28, p.323-327.

TONO, T; TONO K. 1962. The layared structure and its morphological transformation by acid treatment. Journal of Japanese Wood Research Society, 8, p.245-249.

VIJAY RAJ. Treatise on Utilization of Bamboo as Reinforcement in Ferrocement. Journal of Ferrocement: Vol.21 No.4 (October, 1991).

WANG ZHENG GUO WENJING. 2002. Sympodial Bamboo – Chemical composition and fiber characteristics. Research Institute of Wood Industry 100091. Beijing, Chinese. 6p

WEGST UGK S. 1993. Laminated Panel Manufacture of Two Kinds of Bamboo for Architecture Material and Property Comparison. Research Institute of Wood Industry 100091. Beijing, Chinese. 12p.

ZHOU, F.C. 1981. Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. Journal of Nanjing Technology College of Forest Products, 2, 1-32.

## ANEXO

### TABLAS DE ANÁLISIS DE VARIANZA

Tabla 1. Análisis de varianza para el porcentaje de parénquima

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Partes	1	1502,47	1502,47	129,08	<0,0001
Sentido	2	370,069	185,034	15,9	<0,0001
Capa	2	11775,9	5887,95	505,85	<0,0001
Partes*Sentido	2	286,65	143,325	12,31	0,6544
Partes*Capa	2	445,026	222,513	19,12	0,9811
Sentido*Capa	4	176,662	44,1654	3,79	0,2411
Partes*Sentido*Capa	4	178,096	44,5239	3,83	0,7097
Error	42	488,873	11,6398		
Total	59	15440,1			
Número de observaciones 60 1,4 (1,9656)		R <sup>2</sup> = 0,9683		Durbin Watson mayor que	

Tabla 2. Análisis de varianza para el número de haces vasculares.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Partes	1	3853,37	3853,37	4,12	0,0498
Sentido	2	37093,5	18546,8	19,83	<0,0001
Capa	2	2,60E+06	1,30E+06	1390,84	<0,0001
Partes*Sentido	2	2920,47	1460,24	1,56	0,2237
Partes*Capa	2	680,622	340,311	0,36	0,6975
Sentido*Capa	4	27799,4	6949,86	7,43	0,0002
Partes*Sentido*Capa	4	2499,32	624,829	0,67	0,6183
Error	36	33669,2	935,256		
Total	53	2,71E+06			
Número de observaciones 54 1,4 (1,76551)		R <sup>2</sup> = 0,9875		Durbin Watson mayor que	

Tabla 3. Análisis de varianza para porcentaje en la distribución de las células de tejido conductivo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Partes	1	34,4481	34,4481	9,42	0,0041
Sentido	2	109,392	54,6962	14,96	<0,0001
Capa	2	115,09	57,5451	15,74	<0,0001
Partes*Sentido	2	287,868	143,934	39,37	<0,0001
Partes*Capa	2	53,2445	26,6223	7,28	0,0022
Sentido*Capa	4	168,637	42,1592	11,53	<0,0001
Partes*Sentido*Capa	4	128,19	32,0476	8,77	<0,0001
Error	36	131,624	3,65621		
Total	53	1028,49			

Número de observaciones 54  
1,4 (1,9743)

R<sup>2</sup> = 0,8720

Durbin Watson mayor que

Tabla 4. Análisis de varianza para porcentaje en la distribución de las células de fibra.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Partes	1	903,726	903,726	115,53	<0,0001
Sentido	2	336,329	168,164	21,5	<0,0001
Capa	2	12567	6283,5	803,24	<0,0001
Partes*Sentido	2	575,674	287,837	36,79	0,0785
Partes*Capa	2	255,014	127,507	16,3	0,1232
Sentido*Capa	4	149,102	37,2756	4,77	0,0634
Partes*Sentido*Capa	4	411,867	102,967	13,16	0,3451
Error	36	281,618	7,82271		
Total	53	15480,3			

Número de observaciones 54  
1,4 (2,3405)

R<sup>2</sup> = 0,9818

Durbin Watson mayor que

Tabla 5. Análisis de varianza para la densidad.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Nudo	1	0,00316875	0,00316875	0,88	0,3506
Partes	1	0,0652687	0,0652687	18,04	<0,0001
Zona	3	7,06352	2,35451	650,93	<0,0001
Nudo*Partes	1	0,00460208	0,00460208	1,27	0,2609
Nudo*Zona	3	0,00465625	0,00155208	0,43	0,7324
Partes*Zona	3	0,0235729	0,00785764	2,17	0,093
Nudo*Partes*Zona	3	0,00128958	0,00042986	0,12	0,9489
Error	176	0,636617	0,00361714		
Total	191	7,8027			

Número de observaciones 192  
1,4 (1,8074)

R<sup>2</sup> = 0,9184

Durbin Watson mayor que

Tabla 6. Análisis de varianza para el esfuerzo máximo.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
sentido	1	19684	19684	274,81	<0,0001
Partes	1	4167,81	4167,81	58,19	<0,0001
Nudo	1	5307,45	5307,45	74,1	<0,0001
Zona	2	311812	155906	2176,59	<0,0001
Humedad	1	597938	597938	8347,77	<0,0001
sentido*Partes	1	240,509	240,509	3,36	0,0688
sentido*Nudo	1	1935,54	1935,54	27,02	0,5487
sentido*Zona	2	201,209	100,605	1,4	0,2486
sentido*Humedad	1	17703	17703	247,15	0,4578
Partes*Nudo	1	383,72	383,72	5,36	0,0987
Partes*Zona	2	382,667	191,334	2,67	0,0724
Partes*Humedad	1	499,069	499,069	6,97	0,0741
Nudo*Zona	2	2000,75	1000,38	13,97	0,1235
Nudo*Humedad	1	6957,8	6957,8	97,14	0,2356
Zona*Humedad	2	249314	124657	1740,33	0,6548
sentido*Partes*Nudo	1	79,2717	79,2717	1,11	0,2944
sentido*Nudo*Zona	2	2434,53	1217,26	16,99	0,6545
sentido*Zona*Humedad	2	181,694	90,8472	1,27	0,2842
Partes*Nudo*Zona	2	1211,03	605,514	8,45	0,0989
Partes*Zona*Humedad	2	4561,35	2280,67	31,84	0,3236
Nudo*Zona*Humedad	2	5080,82	2540,41	35,47	0,6542
sentido*Partes*Nudo*Zon	2	672,374	336,187	4,69	0,0654
Partes*Nudo*Zona*Hume	2	122,198	61,0991	0,85	0,4281
sentid*Parte*Nud*Zon*H	2	1491,14	745,571	10,41	0,0774
Error	154	11030,8	71,6285		
Total	191	1,25E+06			

Número de observaciones 192  
1,4 (1,4987)

R<sup>2</sup> = 0,9911

Durbin Watson mayor que

Tabla 7. Análisis de varianza para esfuerzos a tensión.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Valor F	Pr > F
Nudo	1	30735,2	30735,2	88,06	<0,0001
Partes	1	5995,44	5995,44	17,18	0,0002
zonas	3	38643,2	12881,1	36,91	<0,0001
Nudo*Partes	1	1931,2	1931,2	5,53	0,2244
Nudo*zonas	3	10550,1	3516,71	10,08	0,1001
Partes*zonas	3	334,778	111,593	0,32	0,8110
Residual	35	12215,2	349,007		
Total	53	1028,49			

Número de observaciones 54  
1,4 (2,2200)

R<sup>2</sup> = 0,8733

Durbin Watson mayor que