

**INFLUENCIA DE LA DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS SOBRE LA  
RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN, TENSIÓN Y FLEXIÓN DE  
LA GUADUA *ANGUSTIFOLIA KUNTH***

**GERMAN ADOLFO DÍAZ RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2012**

**INFLUENCIA DE LA DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS SOBRE LA  
RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN, TENSIÓN Y FLEXIÓN DE  
LA GUADUA *ANGUSTIFOLIA KUNTH***

**GERMAN ADOLFO DÍAZ RAMÍREZ**  
Diseñador Industrial

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magister en  
Ingeniería de Materiales

**DIRECTOR**  
**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNÁNDEZ**  
Ingeniero Civil, Ph. D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2012**

Dedicatoria:

*A David Santiago,  
Mi orgullo y mejor creación  
A Sandra Milena,  
Mi constante e incondicional apoyo; mi cómplice  
A Elisabeth,  
A quien debo mi existencia y la esencia de mi ser*

## CONTENIDO

|  | Pág.      |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCION</b>  | <b>13</b> |
| <b>1 MARCO TEORICO</b>   | <b>16</b> |
| 1.1 GENERALIDADES ACERCA DE LA GUADUA  | 16        |
| 1.2 PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS  | 23        |
| 1.2.1 LA DENSIDAD APARENTE   | 24        |
| 1.2.2 COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN  | 25        |
| 1.2.3 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN   | 27        |
| 1.2.4 COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN  | 27        |
| 1.3 RELACION ENTRE PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS   | 28        |
| 1.4 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS BAMBÚES   | 32        |
| 1.4.1 MATERIALES COMPUESTOS DERIVADOS  | 33        |
| 1.4.2 GUADUA LAMINADA ESTRUCTURAL  | 34        |
| <b>2 MATERIALES Y METODOS</b>  | <b>35</b> |
| 2.1 MATERIAL BASE  | 35        |
| 2.2 CARACTERIZACION ÓPTICA   | 36        |
| 2.2.1 PREPARACION DE PROBETAS  | 36        |
| 2.2.2 TOMA DE MICROGRAFÍAS   | 38        |
| 2.2.3 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES  | 39        |
| 2.3 CARACTERIZACION MECÁNICA   | 41        |
| 2.3.1 EQUIPOS Y PROTOCOLOS   | 42        |
| <b>3 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>   | <b>51</b> |
| 3.1 DIÁMETRO EXTERIOR Y ESPESOR  | 51        |
| 3.2 DENSIDAD APARENTE  | 52        |
| 3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS  | 60        |
| 3.3.1 COMPRESIÓN   | 60        |
| 3.3.2 FLEXIÓN  | 65        |
| 3.3.3 TRACCIÓN   | 70        |
| <b>4 DISCUSION DE RESULTADOS</b>   | <b>75</b> |
| 4.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD APARENTE   | 75        |
| 4.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS  | 78        |
| 4.3 RELACION DE LA VARIACION DE LA DENSIDAD APARENTE<br>RESPECTO A LAS PROPIEDADES MECANICAS | 80        |
| <b>5 CONCLUSIONES</b>  | <b>91</b> |
| <b>CITAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | <b>95</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>99</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|            |  | Pág. |
|------------|--|------|
| Figura 1.  | Taxonomía de la Guadua <i>Angustifolia Kunth</i>   | 17   |
| Figura 2.  | Anatomía de los tallos de bambú.   | 18   |
| Figura 3.  | Morfología de haces vasculares   | 20   |
| Figura 4.  | Corte longitudinal del culmo de Guadua <i>Angustifolia Kunth</i>   | 21   |
| Figura 5.  | Haz vascular de Guadua <i>Angustifolia Kunth</i>   | 22   |
| Figura 6.  | Comparación de resistencia y rigidez por volumen de bambúes  | 24   |
| Figura 7.  | Montajes de ensayos de flexión en GAK en elementos rollizos y secciones pequeñas   | 27   |
| Figura 8.  | Zonas en sección transversal de culmo de GAK   | 28   |
| Figura 9.  | Estudios comparativos de resistencias a tracción de Guadua   | 29   |
| Figura 10. | Densidad de fibras esclerénquimas vs. Diámetro exterior en variedades Mao Zhu y kao Zhu  | 30   |
| Figura 11. | Variación del módulo de elasticidad y la resistencia a tracción a diferentes alturas y espesor de capas en muestras de Moso Bambú ( <i>phyllostachys pubescens</i> ) | 31   |
| Figura 12  | Equipo de corte con disco abrasivo para muestras metalográficas  | 37   |
| Figura 13  | Montaje de muestras de GAK en resina poliéster   | 37   |
| Figura 14  | Equipo de desbaste y pulido de velocidad variable  | 38   |
| Figura 15  | Microscopio óptico de campo amplio Carl Zeiss Axio Imager Z1   | 38   |
| Figura 16  | Elaboración de mosaicos con Autostich 2.2  | 39   |
| Figura 17  | Tratamiento digital y mejoramiento de contraste en la imagen   | 40   |
| Figura 18  | Segmentación y binarización de imágenes con Matlab   | 40   |
| Figura 19  | Esquema general de extracción de las probetas para ensayos mecánicos de GAK  | 41   |
| Figura 20  | Esquema de probeta para ensayo de compresión   | 42   |
| Figura 21  | Equipo universal de ensayos Multitest System MTS 50  | 43   |
| Figura 22  | Probeta de compresión acoplada al equipo de ensayos y ajuste de cara transversal mediante disco abrasivo   | 43   |
| Figura 23  | Esquema de extracción de las probetas para ensayos de flexión  | 45   |
| Figura 24  | Posibilidades de dirección de aplicación de la carga en ensayos de flexión para probetas pequeñas de GAK.  | 46   |
| Figura 25  | Deformaciones en la zona de aplicación de la carga en ensayos de flexión sobre probetas pequeñas de GAK  | 47   |
| Figura 26  | Maquina de ensayos universal Tinius Olsen H25KS  | 47   |
| Figura 27  | Esquema de extracción y geometría de las probetas para los ensayos de tracción   | 49   |
| Figura 28  | Comportamiento de Diámetro Exterior vs. Espesor de sección en muestras de GAK.   | 51   |
| Figura 29  | Variaciones de sección medida para determinar densidad   | 53   |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
|           | aparente de fibras de GAK.  |    |
| Figura 30 | Densidad aparente de fibras vs. Espesor de sección en muestras de cepas de GAK  | 54 |
| Figura 31 | Densidad aparente de fibras vs. Diámetro exterior en muestras de cepas de GAK.  | 55 |
| Figura 32 | Relación entre el espesor de sección transversal y la Densidad aparente de Fibras para muestras de Basas de GAK.        | 56 |
| Figura 33 | Relación entre el Diámetro exterior de sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Basas       | 57 |
| Figura 34 | Relación entre el espesor de sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Sobrebasas            | 58 |
| Figura 35 | Relación entre el Diámetro exterior de sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Sobrebasas. | 59 |
| Figura 36 | Curva esfuerzo-deformación en muestras de Cepas de GAK sometidas a compresión.  | 61 |
| Figura 37 | Curva esfuerzo-deformación en muestras de Basas de GAK sometidas a compresión.  | 62 |
| Figura 38 | Curva esfuerzo-deformación en muestras de Sobrebasas de GAK sometidas a compresión.                                     | 63 |
| Figura 39 | Curvas esfuerzo-deformación promedio según el tipo de muestras de GAK sometidas a compresión.                           | 64 |
| Figura 40 | Comportamiento mecánico de muestras de Cepas de GAK sometidas a flexión.  | 66 |
| Figura 41 | Comportamiento mecánico de muestras de Basas de GAK sometidas a flexión.  | 67 |
| Figura 42 | Comportamiento mecánico de muestras de Sobrebasas de GAK sometidas a flexión.   | 68 |
| Figura 43 | Curvas esfuerzo-deformación promedio según el tipo de muestras de GAK sometidas a Flexión.                              | 69 |
| Figura 44 | Comportamiento mecánico de muestras de Cepas de GAK sometidas a Tracción.   | 71 |
| Figura 45 | Comportamiento mecánico de muestras de Basas de GAK sometidas a Tracción.   | 72 |
| Figura 46 | Comportamiento mecánico de muestras de Sobrebasas de GAK sometidas a Tracción.  | 73 |
| Figura 47 | Esquemas de variación radial de la densidad aparente de fibras en tres diferentes alturas de GAK                        | 76 |
| Figura 48 | Esquemas de preparación de las caras radiales de las probetas para ensayos mecánicos de GAK                             | 78 |
| Figura 49 | Módulo de elasticidad a compresión vs. Densidad aparente de fibras de GAK   | 81 |
| Figura 50 | Esfuerzo máximo a compresión vs. Densidad aparente de fibras de GAK   | 82 |
| Figura 51 | Módulo de elasticidad a flexión vs. Densidad aparente de  | 83 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
|           | fibras de GAK   |    |
| Figura 52 | Módulo de elasticidad a flexión vs. Densidad aparente de fibras unificando Basas y Sobrebasas de GAK                | 84 |
| Figura 53 | Esfuerzo máximo a flexión vs. Densidad aparente de fibras de GAK.   | 85 |
| Figura 54 | Módulo de elasticidad a tracción vs. Densidad aparente de fibras de GAK   | 86 |
| Figura 55 | Esfuerzo máximo a tracción vs. Densidad aparente de fibras de GAK   | 87 |
| Figura 56 | Esfuerzo máximo a tracción vs. Densidad aparente de fibras unificando muestras de Cepas , Basas y Sobrebasas de GAK | 88 |

## LISTA DE TABLAS

|           |  | Pág. |
|-----------|--|------|
| Tabla 1.  | Porcentaje de tejidos en <i>Guadua angustifolia</i> y en diferentes especies de bambúes  | 22   |
| Tabla 2.  | Valores de esfuerzo a compresión vs. Contenido de humedad de GAK   | 25   |
| Tabla 3.  | Valores de esfuerzo a compresión vs. Altura de tramo y edad de GAK   | 26   |
| Tabla 4.  | Valores de esfuerzo a compresión vs. Altura de tramo de GAK  | 26   |
| Tabla 5.  | Cuadro comparativo de condiciones climáticas en La tebaida (Quindío) y Bucaramanga (Santander).  | 35   |
| Tabla 6.  | Comparación de durezas de algunos metales blandos respecto a la GAK.   | 36   |
| Tabla 7.  | Comparación de densidades aparentes en diferentes tamaños de área de una misma muestra de Cepa.  | 53   |
| Tabla 8.  | Valores de áreas de sección transversal observadas, espesores, diámetros exteriores y promedio de densidades aparentes de fibras en Cepas de GAK.                  | 54   |
| Tabla 9.  | Valores de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de Basas de GAK.   | 56   |
| Tabla 10. | Valores de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de Sobrebasas de GAK.  | 58   |
| Tabla 11. | Valores totales promedio de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de GAK.   | 60   |
| Tabla 12. | Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación máxima, modulo de elasticidad y esfuerzo de rotura para muestras de GAK sometidas a compresión.           | 65   |
| Tabla 13. | Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación al momento de la rotura y modulo de elasticidad para muestras de GAK sometidas a ensayos de flexión.      | 69   |
| Tabla 14. | Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación al momento de la rotura y modulo de elasticidad para muestras de GAK sometidas a ensayos de tracción.     | 74   |
| Tabla 15. | Valores promedio de Diámetro exterior, espesor, relación Diámetro exterior/espesor y densidad aparente de Fibras para muestras de Cepas, Basas y Sobrebasas de GAK | 75   |
| Tabla 16. | Valores promedio de Módulo de elasticidad y esfuerzo máximo ante esfuerzos de compresión, flexión y tracción y a tres alturas de culmo de GAK                      | 79   |
| Tabla 17. | Relación entre radio exterior y espesor de sección transversal de GAK  | 90   |

## RESUMEN

**TITULO:** INFLUENCIA DE LA DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS SOBRE LA RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN, TENSIÓN Y FLEXIÓN DE LA GUADUA *ANGUSTIFOLIA KUNTH*.\*

**AUTOR** German A. Díaz Ramírez\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Guadua *Angustifolia Kunth*, Densidad Aparente, propiedades mecánicas.

### DESCRIPCION

Esta investigación propone una relación entre la Densidad Aparente de Fibras (DAF) y las propiedades mecánicas de la Guadua *Angustifolia Kunth* (GAK). Para ello se tomaron muestras a tres diferentes alturas (cepa, basa, y sobrebasa) de la guadua y se caracterizaron mecánicamente encontrando su resistencia a compresión longitudinal, flexión y tracción longitudinal; así mismo, mediante microscopía óptica de campo amplio se determinó la densidad aparente de fibras sobre las secciones transversales con el uso de un protocolo desarrollado para tal fin.

Se estudió la variación de las propiedades mecánicas con respecto a la variación de las dimensiones de la sección transversal y el espesor; se realizó el análisis de la variación de la densidad aparente de fibras en cada sección y se comparó con sus diámetros, espesores y propiedades mecánicas.

Se encontró que la resistencia mecánica del material aumenta con el aumento de la densidad aparente de fibras; tendencia que aumenta con la mayor altura de la sección analizada y con la disminución del espesor del material. La GAK muestra mayores resistencias a la tracción longitudinal y la flexión que a la compresión longitudinal.

Finalmente, se estableció una relación matemática entre la densidad aparente de fibras y los valores de resistencia ante las diferentes sollicitaciones para caracterizar mecánicamente el material mediante métodos de microscopía óptica de campo amplio.

---

\* Trabajo de investigación.

\*\* Facultad de ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de materiales, Maestría en Ingeniería de Materiales, Director: Ricardo A. Cruz Hernández, Ph D.

## ABSTRACT

**TITULO:** SPECIFIC GRAVITY OF FIBERS INFLUENCE ON THE COMPRESIVE, FLEXURAL AND TENSILE RESISTANCE OF THE GUADUA *ANGUSTIFOLIA KUNTH*.\*\*

**AUTOR:** German A. Díaz Ramírez\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Guadua *Angustifolia Kunth*, fibers Specific Gravity, mechanical properties.

### DESCRIPTION

This research propounds a relationship between the fibers density and the mechanical properties of Guadua *Angustifolia Kunth* (GAK). For that purpose samples were taken from three different heights of the culm (bottom, middle and top) and also the mechanical characterization of the material was made after the longitudinal compressive stress, bending and longitudinal tensile strength were found; likewise, by wide-field optical microscopy cross sections were observed respectively in order to determine the fibers density, for which an appropriate protocol was developed.

The variation of mechanical properties was analyzed with respect to the variation of the cross-sectional dimensions and thickness; the analysis of variations of specific gravity was performed in the same sections and was compared in turn with the respective diameters, thicknesses, and mechanical properties.

It was found that the mechanical strength of the material increases with the increasing of fiber density; this trend is favored by increasing the height of the section analyzed and the reduction of material thickness. The GAK shows higher resistances to the longitudinal traction and flexural stress instead of the longitudinal compressive load.

Finally, it was established a mathematical relationship between the fibers specific gravity and the values of resistance to the different stresses in order to characterize mechanically the material by wide-field optical microscopy methods.

---

\* Research work.

\*\* Physical Chemistry Faculty of Engineering, School of Metallurgical Engineering and Material Science, Master in Materials Engineering, Project Director: Ricardo A. Cruz Hernández, Ph. D.

## INTRODUCCION

La Guadua *Angustifolia Kunth* (GAK) es ampliamente conocida por sus propiedades mecánicas, haciéndola un material de características favorables para su uso en la construcción.

Entre sus particularidades se destaca el comportamiento anisotrópico de su microestructura, el cual explica los mayores valores de resistencia se dan en la dirección longitudinal, por la distribución de sus haces vasculares.

De acuerdo a lo anterior, la caracterización del comportamiento mecánico de la GAK es de suma importancia con el fin de determinar su posible aplicación estructural. Estas propiedades se evalúan, normalmente, por medio de ensayos mecánicos, requiriéndose para ello la fabricación de probetas que consumen buena cantidad de material. Así mismo, los protocolos de pruebas difieren bastante de un país a otro.

En este proyecto se propone una metodología alternativa, ya estudiada en otras especies de bambúes, consistente en determinar las propiedades mecánicas mediante correlaciones matemáticas con otras propiedades de tipo físico como las dimensionales a nivel macroscópico (diámetros y espesores), la cantidad de haces vasculares o el área que estos ocupan en relación con el área de sección transversal total que los contiene a nivel microscópico, propiedad que es conocida como densidad aparente de fibras.

La importancia de mejorar los métodos de caracterización de estos materiales naturales como la GAK, para predecir su comportamiento estructural, radica en el mejor aprovechamiento del material, la disminución del costo de evaluación de propiedades, la facilidad de aplicación que redundará en un mejor conocimiento del material para su óptima aplicación. Se propone la GAK particularmente para la elaboración de compuestos encolados laminados de uso estructural, con elementos de sección transversal del orden de 100 mm<sup>2</sup> de sección. A este nivel se pueden presentar variaciones importantes en su microestructura y en sus

propiedades mecánicas, haciéndose más importante lograr una disposición adecuada de estos elementos en la conformación de un material compuesto.

El objetivo general de este trabajo, por lo tanto, es analizar la influencia de la densidad aparente de fibras sobre la resistencia a sollicitaciones de tensión, compresión y flexión de la *Guadua Angustifolia Kunth*. Así mismo los objetivos específicos son:

- Evaluar la variación de la densidad aparente de fibras en la *Guadua Angustifolia Kunth* sobre la cara transversal del material mediante microscopía óptica de campo amplio y tratamiento digital de imágenes.
- Evaluar la influencia de la densidad aparente de fibras sobre la resistencia del material ante sollicitaciones de tensión, compresión y flexión mediante ensayos mecánicos.
- Establecer una correlación matemática entre los valores de densidad aparente de GAK y las propiedades mecánicas analizadas mediante regresión lineal.

Como hipótesis de la investigación se plantea la posibilidad de establecer una correlación de tipo lineal entre los valores de los esfuerzos a compresión, flexión y tensión y las propiedades físicas dimensionales como diámetros y espesores y la densidad aparente de fibras.

Con el fin de comprobar esta hipótesis se determinó la densidad aparente de fibras y se analizó su variación con la altura de sección, y en la dirección radial con cada altura mediante microscopía óptica de campo amplio, desarrollándose un protocolo de preparación de las probetas.

Por otra parte, para determinar las propiedades mecánicas de la GAK, se hicieron ensayos de compresión, flexión y tensión. Finalmente se analizó la variación del comportamiento mecánico, así como la variación de las propiedades físicas

mencionadas y se establecieron las correlaciones lineales que permiten determinar sus propiedades mecánicas en función de las propiedades físicas.

El desarrollo del presente proyecto de investigación tiene como propósito contribuir al acervo de conocimiento que hasta ahora se tiene del material, en relación con la caracterización física del mismo, a través de la densidad relativa de fibras y la influencia que su variación tiene sobre el comportamiento macroscópico del material a nivel físico-mecánico.

Se espera que los resultados del estudio aporten criterios de selección de procedimientos para la fabricación de laminados de tipo estructural, tal que contribuyan al fortalecimiento de la cadena productiva del sector, logrando con esto, aumentar la competitividad de nuestro Bambú, en relación con las aplicaciones estructurales de este material a nivel de construcción en el contexto Colombiano.

En resumen, la presente investigación se propone tomar la densidad aparente de la GAK como punto de partida para el análisis del comportamiento mecánico del material a nivel macroscópico. Al respecto, se sabe que la presencia de fibras parénquimas, encargadas de las funciones estructurales en la guadua, en proporción con la sección transversal, es mayor en la periferia de la sección transversal que en el interior de la misma; además aumenta de la parte inferior a la superior del tallo, sin embargo no se han desarrollado métodos o protocolos para su determinación.

El trabajo se ha organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describe el contexto teórico de la investigación, en relación con las generalidades, comportamiento físico y mecánico del material; en el capítulo 2 se detallan los protocolos seguidos en el proceso investigativo; en el capítulo 3 se presentan todos los resultados experimentales; en el capítulo 4 se hace el análisis de los resultados, la discusión de los mismos y la deducción de las relaciones propuestas en los objetivos. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se hacen las recomendaciones para investigaciones futuras.

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 GENERALIDADES ACERCA DE LA GUADUA

La *Guadua Angustifolia Kunth*, en nuestro medio llamada comúnmente “Guadua”, es una planta de la subfamilia de las Bambusoidae, las cuales pertenecen a su vez a una de las familias botánicas más extensas e importantes: las gramíneas o Poaceae, cuyo nombre común es el Bambú.

Los bambúes pueden tener longitudes que varia desde menos de un metro o menos hasta 25 m o mas de alto, con tallos de diámetros desde un cm o menos hasta 30 cm o más.

En el mundo existen más de 1200 especies de 50 géneros de bambúes, en su mayoría distribuidos en zonas tropicales y subtropicales. China posee alrededor de 400 especies en 50 géneros y su área de crecimiento asciende a 4.21 millones de hectáreas.[1].

En el continente americano, los bambúes crecen en casi todas las regiones subtropicales, además es posible también encontrarlos en México, Argentina y Brasil. De ellos la guadua es una especie endémica distribuida en aproximadamente 25 especies.

#### ***Taxonomía de la GAK***

La guadua es el bambú americano que se encuentra en mayor cantidad y variedad. La *Guadua angustifolia* tiene tres variedades o razas geográficas: *Guadua angustifolia Kunth*, *Guadua angustifolia* variedad *bicolor* , y *Guadua angustifolia* variedad *nigra* (Londoño) [2].

Es posible distinguir dos tipos de guadua según su mecanismo de crecimiento: los de hábito de crecimiento erecto o vertical y los de crecimiento colgados o trepados. De los anteriores, la *Guadua Angustifolia* pertenece al primer grupo y se caracteriza principalmente por un crecimiento vertical o ligeramente arqueado, tener rizomas bien desarrollados, tallos leñosos y fuertes, de diámetros entre 5 y 30 cm y longitudes entre 7 y 30 m y contar con hojas singulares ubicadas a un

ángulo aproximado de 45° del tallo.

El género *Guadua* Kunth contiene aproximadamente 40 especies, las cuales varían ampliamente en dimensiones de tallos en longitudes y diámetros.(figura 1)

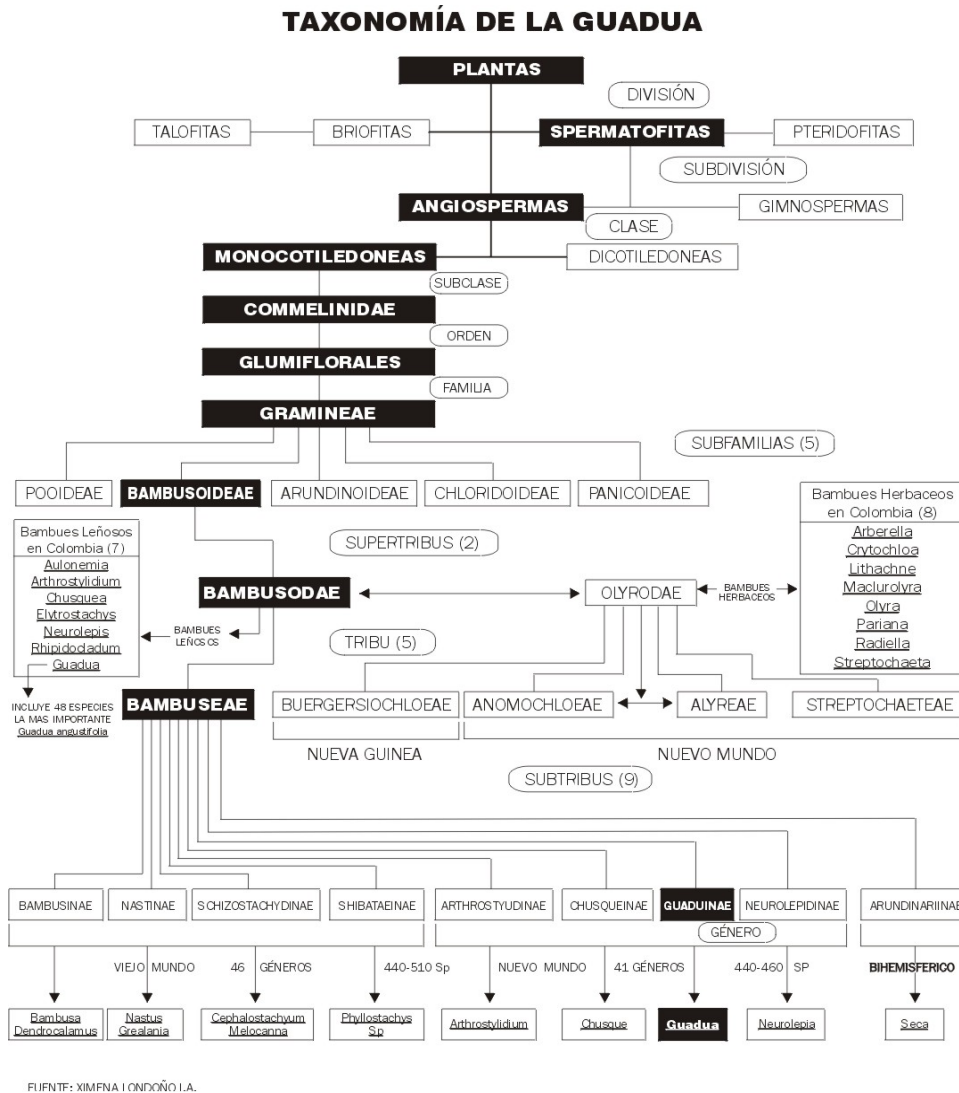


Figura 1: taxonomía del genero guadua (Londoño S.F.)

### Morfología de la GAK

Según Hidalgo (2003), morfológicamente en una *G. angustifolia* se pueden distinguir las siguientes partes: rizoma, tallo, hojas, flores y frutos, sin embargo. De ellas el tallo o culmo, se ha aprovechado tradicionalmente para diferentes aplicaciones.

### A. Rizoma

Es un sistema compuesto por tubérculos y rizomas, las cuales poseen nudos y zonas internodales esencialmente compuestos por dos partes: el cuello que es una porción estrecha internodal que no posee yemas y propiamente el rizoma en donde las yemas están presentes en los nudos. Aunque la GAK es una caña hueca, en cuanto a sus aplicaciones industriales se considera un tallo leñoso y maderable.

### B. Tallo

El tallo consta de tres partes: la base, el peciolo y el tallo mismo. Crece en forma cilíndrica con tendencia vertical formando nudos y zonas internodales; los nudos se distancian a medida que el tallo gana altura y al igual que los tallos, estos tienen forma circular o tienden a tenerla; en total una guadua madura puede alcanzar una altura de 22 metros y puede contener hasta 60 nudos aproximadamente.(Figura 2)

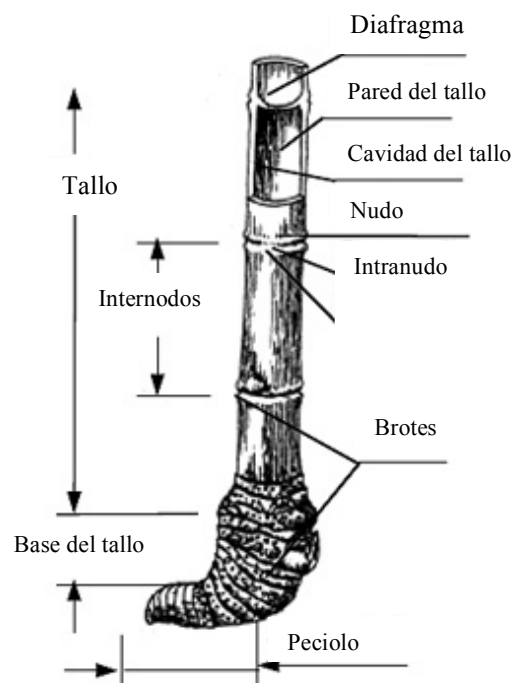


Figura 2. Anatomía de los tallos de bambú. Oisheng (2001).

### C. Hojas, flores y frutos

Las hojas crecen en las ramificaciones superiores de manera alternada a partir de los nudos (Giraldo y Sabogal 1999), cada rama nueva está protegida por una hoja o bráctea, la cual se cae con la maduración y el crecimiento de la rama. Las hojas forman el follaje de la planta y terminan en una sola espiga llamada la florescencia principal, aunque otras ramas florales se pueden originar a partir de yemas vegetativas más lejanas de las ramas superiores.

En cuanto a los frutos y semillas, estos se encuentran en el primer tercio de la inflorescencia o espiga y son escasos; la semilla se asemeja a un grano de arroz en su forma y tamaño, y son de coloración blanca en su exterior. [3]

### ***Caracterización del culmo***

La estructura anatómica del culmo consta principalmente de dos partes: un tejido parenquimático que hace las veces de matriz en el material y un sistema de haces vasculares y fibras esclerénquimas que actúan como refuerzo; en proporciones, el tejido parénquimo ocupa aproximadamente el 60% y la cantidad de haces vasculares el restante 40% de todo el tejido. Janssen (1981).

Según Londoño (2002), la forma, tamaño, número y concentración de haces vasculares varía desde la periferia hacia la parte interna del culmo y desde la base del culmo hacia el ápice. Cerca de la periferia los haces vasculares son pequeños, numerosos y concentrados mientras que en la parte media de la sección transversal, son más grandes y poseen una distribución más amplia. En todos los bambúes el tamaño de los haces vasculares decrece notoriamente desde la base hacia el ápice mientras que su densidad se incrementa correspondientemente.

En un culmo de GAK se pueden distinguir los siguientes tipos de tejidos:

- 1) Corteza: es la parte externa del culmo y funciona como una capa protectora del tejido y conservante de la humedad, se compone de hipodermis e hipodermis. (liese, 1998). En la epidermis se concentran grandes cantidades de sílice, lo cual contribuye a su dureza característica, mientras que en la hipodermis consiste en agrupaciones de células esclerenquimatosas de pared gruesa.
- 2) Parénquima: este tejido según Grosser & Liese (1971) está compuesto de

celular largas y cortas. Las células largas poseen paredes mas gruesas mientras que las células cortas son más pequeñas y de pared delgada que con el tiempo no se lignifican. Las células parénquimas se conectan entre sí mediante orificios localizados en las paredes longitudinales. (figura 4).

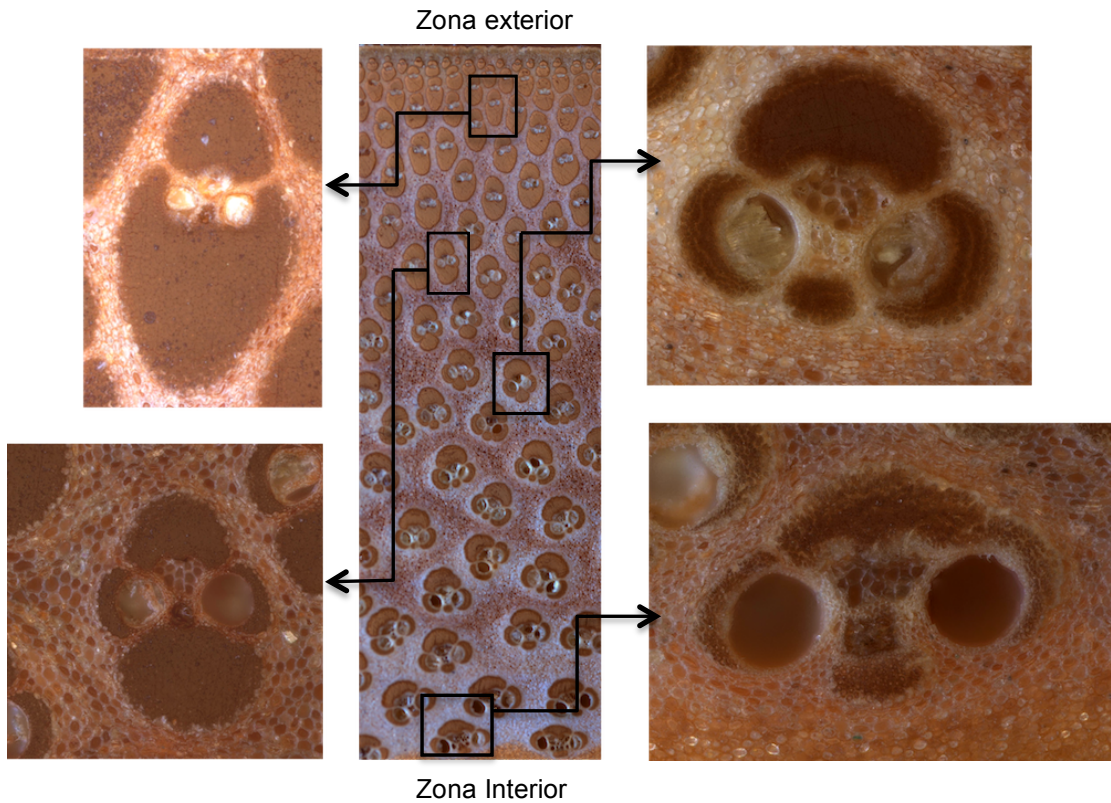


Figura 3. Morfología de los haces vasculares de GAK. Fuente: autor.

3) Haces vasculares: Un haz vascular de GAK, está compuesto por dos grandes vasos de metaxilema, uno o dos elementos de protoxilema, floema, vainas de esclerénquima y fibras. (Figura 3)

Los vasos de metaxilema están separados por tejido parénquima entre los cuales hay un espacio intercelular, estas células son más pequeñas que las de tejido parenquimatoso y poseen más orificios en sus paredes. ( Liese 1998).

Los vasos de metaxilema en *G. angustifolia* tienen un diámetro que varía entre 0.02 - 0.22 mm con una amplia variación a través del espesor de la pared del culmo y a lo largo del mismo.

El floema consta de tubos cribosos grandes de paredes delgadas y sin lignificar,

conectados con células acompañantes, las cuales se caracterizan por poseer un núcleo grande y citoplasma denso. En la GAK el floema está compuesto por 14 a 25 vasos cribosos. El tiempo de vida de un culmo es de aproximadamente 10 años para la GAK. (Londoño 1992). [4]

4) Vainas de esclerénquima: estas formaciones compuestas de fibras rodean los haces vasculares y difieren en forma, tamaño, ubicación y orientación. En la parte central e interna de la GAK se presentan cuatro vainas de esclerénquima, una a cada lado de los vasos del metaxilema, uno alrededor del floema y el otro alrededor del espacio intercelular. (Figura 5)

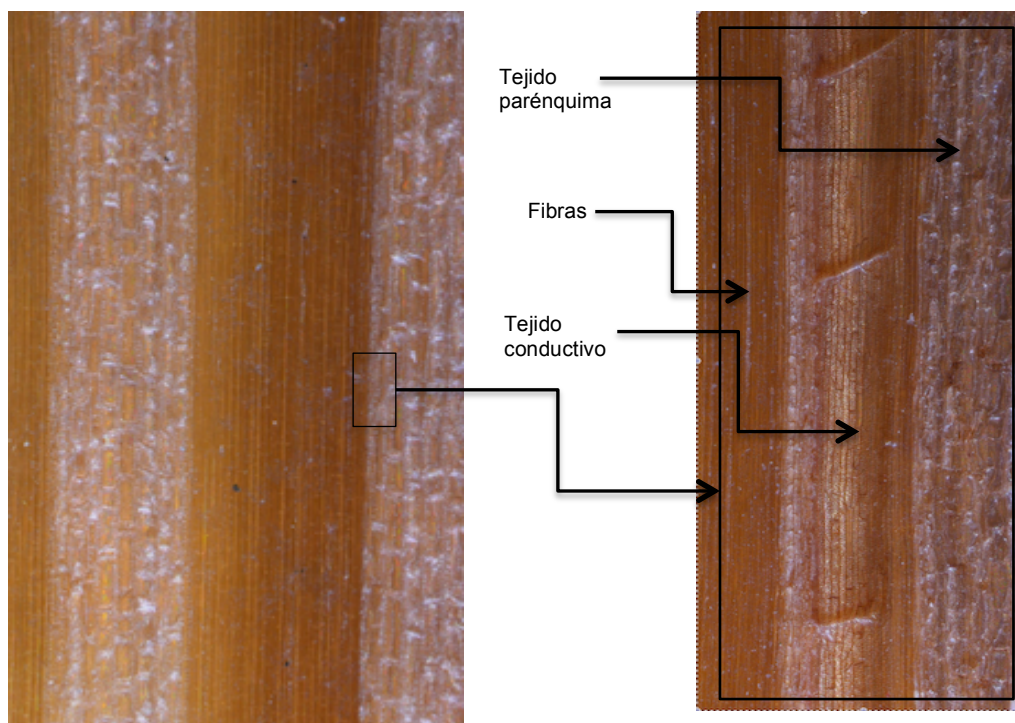


Figura 4. Corte longitudinal del culmo de *Guadua Angustifolia Kunth*. Fuente: autor.

Grosser & Liese establecieron en 1971 cuatro tipos básicos de haces vasculares: I, II, III y IV, los cuales han sido utilizados en investigaciones posteriores para la caracterización anatómica de los diferentes culmos de bambú. [5]

Más adelante Sekar & Balasubramanian (1994) agregaron un subtipo llamado IIA el cual difiere del II en que presenta una vaina de esclerénquima prominente hacia el lado del floema en vez de presentarse hacia el lado del protoxilema.

La especie GAK presenta los tipos de haz vascular II y IIA según su ubicación a través de la pared del culmo, en las cuales se observa un haz vascular central

rodeado por cuatro vainas de esclerénquima: dos ubicadas a lado y lado de los vasos del metaxilema, otra alrededor del protoxilema (espacio intercelular) y la última alrededor del floema. (Figura 5)

En la GAK el porcentaje de fibra por haz vascular fluctúa entre 97% y el 64% observándose mayor porcentaje en los haces vasculares de las zonas exterior y media externa que en los haces vasculares de las zonas media interna e interior.

Según Liese (1998) los valores del porcentaje de fibras varía entre la diferentes especies como se observa en la Tabla 1; se observa una ligera ventaja de la *Guadua Angustifolia* con respecto a otras especies, lo que sumado a sus grandes dimensiones, la hace muy ventajosa como material de construcción.

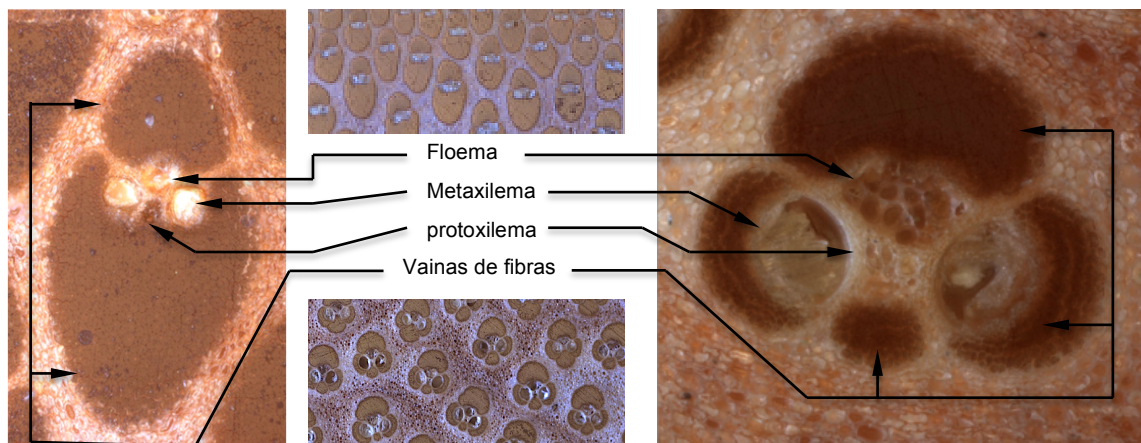


Figura 5. Haz vascular de *Guadua Angustifolia* Kunth. Fuente: autor.

| Tejidos<br><i>G. angustifolia</i> | Segmentos |   |       |    |        |     | Total<br>(*****) |
|-----------------------------------|-----------|---|-------|----|--------|-----|------------------|
|                                   | basal     | * | media | ** | apical | *** |                  |
| parénquima                        | 63        | 8 | 64    | 27 | 36     | 16  | 51               |
| fibra                             | 29        | 4 | 26    | 11 | 56     | 25  | 40               |
| tejido conductivo                 | 8         | 1 | 10    | 4  | 8      | 4   | 9                |

\*\*\*\*\*Factor de conversión: basal= 0.1276 (\*); medio= 0.4186 (\*\*\*) y apical=0.4537 (\*\*\*)

| Especie   | Parénquima | Fibras    | T. conductivo |
|---|------------|-----------|---------------|
| <i>Phyllostachys makinoi</i> *                    | 55         | 37        | 8             |
| <i>Phyllostachys heterocyclus</i> var. pubescens* | 54         | 38        | 8             |
| <i>Schizostachyum brachycladum</i> *              | 54         | 38        | 8             |
| <i>Cephalostachyum pergracile</i> *               | 52         | 40        | 8             |
| <i>Teinostachyum dullooa</i> *                    | 52         | 40        | 8             |
| <b><i>Guadua angustifolia</i></b>                 | <b>51</b>  | <b>40</b> | <b>9</b>      |
| <i>Dendrocalamus hamiltonii</i> *                 | 51         | 41        | 8             |
| <i>Oxytenanthera nigrociliata</i> *               | 51         | 43        | 6             |
| <i>Dendrocalamus strictus</i> *                   | 50         | 43        | 7             |
| <i>Bambusa polymorpha</i> *                       | 48         | 44        | 8             |
| <i>Bambusa tulda</i> *                            | 47         | 45        | 8             |
| <i>Melocanna baccifera</i> *                      | 43         | 50        | 7             |

\* Datos tomados de Liese (1998).

Tabla 1. Porcentaje de tejidos en *Guadua angustifolia* y en diferentes especies de bambúes. Datos tomados de Liese (1998).

Del estudio anatómico de la guadua se puede concluir que existe una relación entre el número de haces vasculares y el porcentaje de fibras. Su número, forma, y en general el área de sección transversal que ocupan aumenta del diámetro interior hacia el exterior.

## **1. 2 PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA GUADUA**

Según Qisheng (2001) las propiedades físicas más importantes de los bambúes son la densidad, el contenido de humedad y el porcentaje de contracción en seco. El contenido de humedad de los bambúes cuando se encuentran en crecimiento es alto y depende de factores como la ubicación del cultivo, de la especie y de las estaciones, pero en términos generales se ubica en el 80% al momento de su aprovechamiento o corte.

La densidad de los bambúes en su juventud se encuentra entre los 0,4 y 0,8 gr/cm<sup>3</sup>. Dicha propiedad depende de la concentración de haces vasculares y varía además con la edad de la planta, aumentando desde las capas internas a las externas y desde la base al ápice del tallo o culmo.

La contracción se debe a la evaporación de agua en el proceso de secado luego del proceso de corte y depende también de la especie y de la humedad relativa del ambiente en donde se haga al proceso de secado. Al respecto Liese (1971) concluyó que la contracción del material se presenta mientras él mismo pierde humedad y dicho mecanismo puede detenerse o reactivarse si el material es expuesto a un proceso de secado.

Para Janssen (2002) la propiedad físico mecánica más importante de los bambúes es la masa del material por unidad de volumen o densidad; para la mayoría de los bambúes la densidad es de 700-800 kg/m<sup>3</sup>, y varía con la calidad del sitio de cultivo, la especie, la posición de la caña y otros factores.

Cuanto mayor sea la masa por volumen, más pesado será el bambú porque más moléculas están presentes en la unidad de volumen. En otras palabras, cuanto mayor sea la masa por volumen, más denso será el material. De esta manera es posible hacer relaciones matemáticas entre la densidad y las propiedades mecánicas del material como por ejemplo la rigidez o la resistencia. (Figura 6)

En los bambúes en general, las propiedades físico-mecánicas pueden presentar grandes variaciones debido a su microestructura heterogénea y a su comportamiento anisotrópico; además de las razones mencionadas anteriormente, se debe tener en cuenta el efecto que pueden causar los nudos y zonas internodales; por ejemplo, el comportamiento mecánico de las zonas internodales es mejor que el de los nudos.

Otro factor que afecta el comportamiento mecánico de los bambúes es su edad: en términos generales, una planta con menos de 2 años aun no tiene buena resistencia y se considera débil, en edades cercanas a los 4 años o en su madurez, el material presenta su mejor desempeño, y cuando este sobrepasa los 7 años se vuelve frágil afectando la resistencia más en las direcciones radiales y transversales que en las longitudinales.

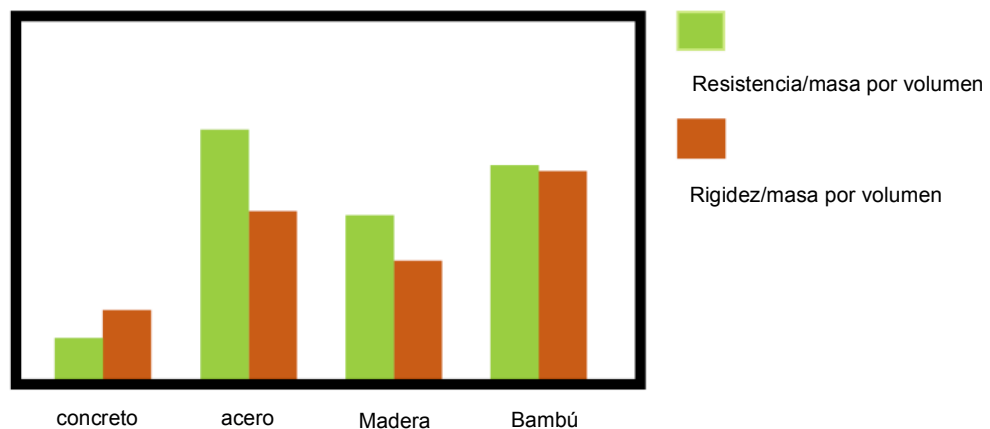


Figura 6. Comparación de resistencia y rigidez por volumen de bambúes. Fuente: Janssen (2000).

### ***Mecánica de la fractura***

Para Janssen (2000) la falla de una probeta de bambú ante un esfuerzo de flexión por ejemplo, no es una verdadera fractura, porque no se produce un rompimiento total de esta, sino un comportamiento similar a la fluencia, con la diferencia que la probeta pareciera no alcanzar la deformación permanente, por lo que a menudo sucede que una vez se suspende el esfuerzo aplicado sobre el material, este tiende a regresar a su geometría original [6].

#### **1.2.1 LA DENSIDAD APARENTE**

La densidad aparente de un material consiste en *el cociente entre la densidad de un cuerpo y la de otro que se toma como unidad*, por lo general agua, dicha relación es adimensional. Esta propiedad física para materiales como las maderas y sus derivados como los bambúes resulta de gran importancia. Para Ahmad (2005) y Li et al. (2004) la densidad aparente de la variedad *Calcutta bamboo* y *Phyllostachys pubescens* respectivamente se situó entre 0,3 y 0,8 [7] [8].

Una variación de dicha densidad se puede establecer de manera bidimensional, esta consiste en la sumatoria de áreas de un material contenido en una sección de área determinada, al respecto Liese (1992) hace un análisis de la influencia del porcentaje de contenido de fibras del bambú en las propiedades mecánicas del material concluyendo que a través de esta variable se puede predecir su comportamiento [9].

Esta propiedad, originalmente conocida en inglés como “*specific gravity*” de acuerdo a los autores mencionados anteriormente, está fuertemente relacionada con las propiedades mecánicas del bambú al mismo tiempo que con sus dimensiones físicas (diámetros y espesores), razón por la que fue escogida como la variable paramétrica más importante de este estudio.

### 1.2.2 COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión paralela se ha investigado en la GAK previamente; una de estas investigaciones llevada a cabo por González y Montoya (2008) concluye que el comportamiento a compresión de la GAK está en el rango de los 18.5 a 43.6 MPa, valores que varían principalmente por el contenido de humedad y la altura del tramo de donde se toman las muestras.

| Probeta N° | Contenido de humedad Promedio (%) | Fuerza máxima F (KN) | Area de la sección A (mm <sup>2</sup> ) | Módulo elástico E (MPa) | Esfuerzo máximo a compresión $\sigma$ (Mpa) |
|------------|-----------------------------------|----------------------|---|-------------------------|---|
| 58         | 12.4                              | 156,7897             | 3593,982                                | 1947                    | 43,6256                                     |
| 35         | 60.6                              | 130,4196             | 7012,0348                               | 603,05                  | 18,5994                                     |

Tabla 2. Valores de esfuerzo a compresión vs. Contenido de humedad de GAK. Tomado de Montoya (2008).

Se encontró también en este estudio que la presencia o ausencia de nudos no afecta de manera significativa dichos valores. Otro factor que influye sobre esta resistencia es la edad. Para este caso las muestras sobremaduras obtuvieron los valores mas altos de resistencia como se puede observar en las tablas 2 y 3 [10].

**Diafragma - Tramo de la Guadua**

Variable dependiente: Esfuerzo Máximo (N/mm<sup>2</sup>)

| Diafragma     | Tramo de la Guadua | Media  | Error típ. | Intervalo de confianza al 95% |                 |
|---------------|--------------------|--------|------------|-------------------------------|-----------------|
|               |                    |        |            | Límite inferior               | Límite superior |
| Con diafragma | Cepa               | 24.526 | 1.677      | 21.154                        | 27.898          |
|               | Basa               | 29.574 | 1.677      | 26.201                        | 32.946          |
|               | Sobrebasa          | 31.264 | 1.677      | 27.892                        | 34.836          |
| Sin diafragma | Cepa               | 24.332 | 1.677      | 20.980                        | 27.704          |
|               | Basa               | 30.708 | 1.677      | 27.336                        | 34.080          |
|               | Sobrebasa          | 32.323 | 1.677      | 28.951                        | 35.895          |

Tabla 3. Valores de esfuerzo a compresión vs. Altura de tramo y edad de GAK. Tomado de Montoya (2008).

Por otra parte, González (2007) analizó la influencia del lugar de procedencia de las muestras, la presencia de otros defectos como fisuras, las cuales son comunes en el material luego del proceso de secado, y los valores que se obtuvieron se pueden observar en la Tabla 4; estos se encontraron entre 29,4 y 118,7 MPa [11].

| Parámetro  | Localización en el culmo |       |            |        |
|--|--------------------------|-------|------------|--------|
|  | Cepas                    | Basas | Sobrebasas | Total  |
| Número de muestras   | 190                      | 336   | 283        | 809    |
| $\sigma_{\text{Mínimo}}$                                   | 29.45                    | 31.68 | 36.31      | 29.45  |
| $\sigma_{\text{Máximo}}$                                   | 92.60                    | 82.27 | 118.79     | 118.79 |
| $\sigma_{\text{Promedio}}$                                 | 50.63                    | 56.42 | 59.70      | 56.21  |
| Desviación estándar  | 9.03                     | 9.35  | 10.21      | 10.16  |
| $\sigma_{\text{c}}$  | 35.38                    | 42.61 | 43.35      | 40.42  |
| $\sigma_{\text{adm}}$ (Carga muerta)                       | 7.86                     | 9.47  | 9.63       | 8.98   |
| $\sigma_{\text{adm}}$ (Carga muerta + Carga viva)          | 9.83                     | 11.84 | 12.04      | 11.23  |
| $\sigma_{\text{adm}}$ (Carga muerta + Carga viva + viento) | 11.79                    | 14.21 | 14.45      | 13.47  |

Tabla 4. Valores de esfuerzo a compresión vs. Altura de tramo de GAK. Tomado de Takeuchi (2007).

En los estudios anteriores se puede observar la variabilidad del comportamiento ante este tipo de esfuerzos, aunque los valores promedio fueron similares.

### 1.2.3 COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN

El comportamiento de la GAK ante este tipo de esfuerzo es igualmente variable y se puede ver afectado por diversos factores como los ya mencionados; además de otros como las dimensiones de su sección transversal, principalmente el diámetro exterior.

Al respecto, estudios se han llevado a cabo estudios que tiene en cuenta estos factores y además otros como la presentación del material ensayado, esto es en forma rolliza como elemento estructural en forma natural y en pequeñas secciones longitudinales como elementos componentes de materiales compuestos encolados laminados (Figura 6).

La resistencia de la GAK en el límite proporcional es en promedio de 34,4 MPa. para elementos rollizos de 2,5 m de largo. Osorio (2005) [12].

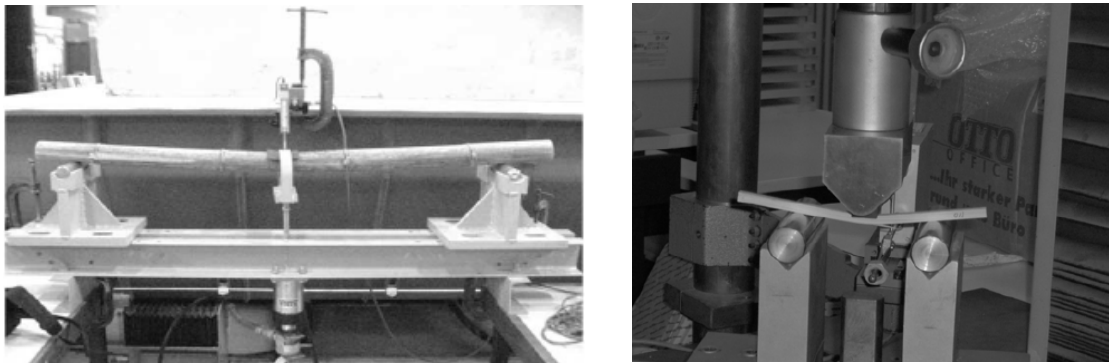


Figura 7. Montajes de ensayos de flexión en GAK en elementos rollizos y secciones pequeñas. Tomado de Chung (2002) y González (2007).

Para muestras pequeñas de secciones González y Montoya (2007) encontraron que el módulo de elasticidad no varía con la edad del tramo o la edad del material ensayado, pero si el modulo de cuyos valores de esfuerzo se oscilaron entre los 87,9 y 122,9 Mpa [13].

### 1.2.4 COMPORTAMIENTO A TRACCION

la resistencia mecánica a esfuerzo de tracción de la GAK es la más alta en comparación con las anteriores, debido a que la dirección de la carga es paralela

a la ubicación de las fibras.

Los valores obtenidos en diferentes estudios varían entre los 140 y 220 MPa; la alta desviación estándar en los valores responde no solo a los factores que se han mencionado anteriormente, sino además al porcentaje de haces vasculares en la sección transversal de la probeta (densidad aparente de fibras), ya sea en la zona exterior, media o interior, o la presencia de nudos en la misma (Figura 7).

Al respecto Ciro y Osorio (2005) analizaron la GAK a tracción y la compararon con otros estudios realizados previamente; los valores de resistencia máxima a tracción referenciados difieren altamente entre si como se muestra en al figura 8; la razón para este comportamiento se puede deber a que los ensayos no se hayan realizado bajo las mismas normas o que no se haya especificado las zonas de la sección transversal utilizadas para la obtención de las probetas. Así mismo la tendencia de falla del material, por su microestructura, hace difícil llevar la falla a la zona débil del a probeta [14] (Figura 8).

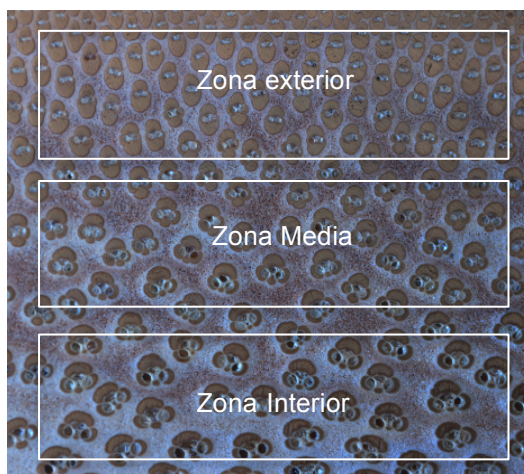


Figura 8. Zonas en sección trasversal de culmo de GAK. Fuente: autor.

### **1.3 RELACION ENTRE LAS PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA GAK**

Como ya se ha mencionado anteriormente, las propiedades físicas que más influyen sobre el comportamiento mecánico de los bambúes, son principalmente, el contenido de humedad, la edad y la densidad; a éstas se pueden añadir los factores relacionados con las dimensiones de la planta propias de cada especie, como el diámetro exterior, el espesor de sección y la altura del culmo.

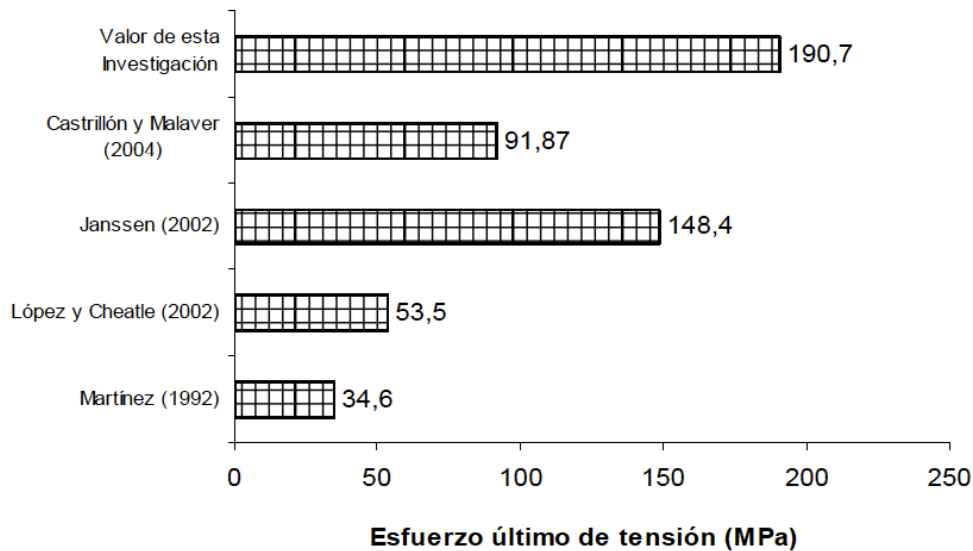


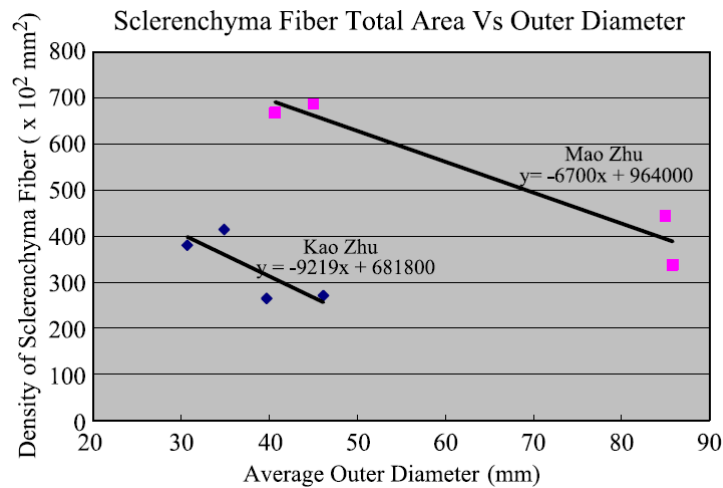
Figura 9. Estudios comparativos de resistencias a tracción de Guadua. (Tomado de: Ciro, Osorio 2005).

A nivel microscópico la propiedad física mas relevante es la densidad aparente de fibras, la cual puede verse afectada por aquellos factores expuestos; dicho comportamiento se puede relacionar con el comportamiento mecánico de los bambúes ante diversos esfuerzos, ya que sus mecanismos de respuesta están íntimamente relacionados con la cantidad de haces vasculares presentes en el material.

Debido a lo anterior, es posible realizar una caracterización mecánica del material más apropiada, a partir de la determinación de la densidad de haces vasculares en las secciones transversales de la GAK.

Lo et al. (2004) estableció una relación lineal entre la densidad aparente de fibras de variedades chinas Mao Zhu Y Kao Zhu con respecto a la resistencia a compresión; en dicho estudio se investigó el efecto del diámetro de las secciones transversales, en las cuales se encontró que las fibras se encuentran dispuestas de manera más compacta hacia las partes altas de la planta, lo que se reflejó en un aumento en la densidad aparente y en la resistencia mecánica ante los esfuerzos de compresión (Figura 9) [15].

De la anterior figura se deduce que existe una relación lineal entre la resistencia a compresión ( $S$ ) y el promedio del diámetro exterior ( $D$ ) en las dos variedades.



$$\text{Mao Zhu : } S_{\text{Mao}} = -0.28D + 71.5$$

$$\text{Kao Zhu : } S_{\text{Kao}} = -0.92D + 85.9$$

Figura 10. Densidad de fibras esclerénquimas vs. Diámetro exterior en variedades Mao Zhu y kao Zhu.

Finalmente los autores del estudio concluyen que la densidad de fibras (densidad aparente) es un buen indicador de la capacidad mecánica del bambú, sin embargo también advierten que los valores que se determinen de la densidad aparente, se pueden verse afectados a su vez por el espesor de la sección transversal.

Los resultados indicaron que la resistencia a compresión para la variedad Mao Zhu y Kao Zhu estuvo entre los 47.0 a 68.2 N/mm<sup>2</sup> y 37.7 a 62.0 N/mm<sup>2</sup> respectivamente, y que decrece notoriamente con el incremento del diámetro exterior, es decir en la partes bajas de la planta, conocidas como segmentos basales o cepas.

De la misma manera Yu et al. (2008) establecieron una relación entre la variación en las propiedades físico-mecánicas ante esfuerzos de tensión, y la densidad en una variedad gigante de bambú ( nombre común: moso bambú) [16].

Se demostró que existe una relación entre la resistencia a tensión de la variedad de Bambú gigante (*Phyllostachys pubescens*) y su densidad en seco, determinada a diferentes alturas y posiciones radiales. Estas se distribuyeron en

tres capas: externa, media e interna, cada una con dos subcapas para un total de seis en el estudio; la edad de las muestras se fijó entre 4 a 6 años. Los resultados mostraron que la variación de la resistencia a tensión de las muestras en la dirección radial fué mayor que en la dirección longitudinal.

El módulo de elasticidad a tensión (MOE), encontrado en dicho estudio, se ubicó entre 8.49 y 32.49 GPa, el cual en la capa exterior resultó entre 3 y 4 veces más alto que en la capa interior. Por otra parte el módulo de ruptura (MOR) se ubicó entre los 115,09 MPa y los 328,15 MPa. El módulo de ruptura en las capas exteriores fue 2 a 3 veces más alta que en la capa interior del material.

Le relación entre las variables mencionadas fué planteada inicialmente según dos ecuaciones, una lineal y una cuadrática [16], de la siguiente manera:

1)  $S = a + bG$  ; para la regresión lineal, donde  $S$  es la resistencia a tensión,  $G$  la densidad relativa y  $a$  y  $b$  son constantes.

2)  $S = a * G^\beta$  ; para la regresión cuadrática donde  $S$  y  $G$ , son respectivamente la resistencia mecánica a tensión y la densidad relativa, y  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes.

Las funciones se tomaron basadas en estudios previos sobre la relación entre propiedades mecánicas y densidad relativa de maderas llevada a cabo por Armstrong y Walton (1984,1986) quienes inicialmente comprobaron de manera

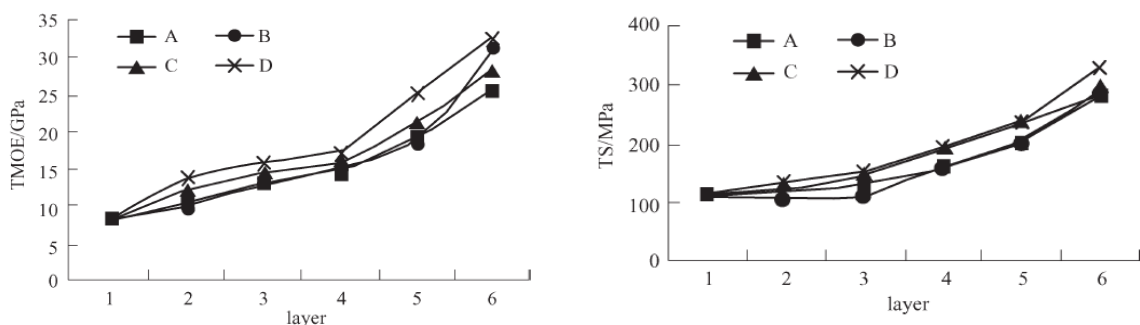


Figura 11. Variación del módulo de elasticidad y la resistencia a tracción a diferentes alturas y espesor de capas en muestras de Moso Bambú (*phyllostachys pubescens*). Tomado de Yu, Fei (2008).

experimental la validez de este modelo teórico propuesto por primera vez por Newlin en 1919 para el USDA Forest Service.

En lado izquierdo de la Figura 11 se muestra la relación entre el módulo de elasticidad a tensión del bambú en diferentes alturas (A, B, C y D) y desde las capas interior a la exterior (1 a 6). Se observa que el módulo de elasticidad decrece gradualmente en las dos direcciones (radial y longitudinal) y que la variación radial fue notoriamente mayor que la longitudinal.

En cuanto al módulo de ruptura (MOR), este disminuyó desde las posiciones exteriores a las interiores, mientras que aumentó desde la copa hacia la base; a una misma altura, el módulo de ruptura en la capa externa fue entre 2 y 3 veces mayor que en la capa interna, igualmente como en el caso anterior, la variación radial fue mucho mayor que la longitudinal.

En conclusión, la relación lineal se ajustó mejor que la cuadrática en cuanto a la predicción del comportamiento mecánico concordando con los estudios previos realizados sobre otras especies maderables. De la misma manera los autores comprobaron que el módulo de elasticidad a tensión de esta especie de bambú, aumenta en dos direcciones, desde adentro hacia afuera y de abajo hacia arriba, correspondiendo con el aumento de los valores de densidad relativa. (YU et al. (2008) [17].

De los anteriores estudios se concluye que es posible establecer relaciones de tipo lineal entre las variaciones de algunas propiedades físicas como las dimensiones y la densidad aparente de fibras con las correspondientes propiedades de tipo mecánico, por lo tanto son modelos válidos para la predicción del comportamiento del material.

#### **1.4 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS BAMBÚES**

Es posible mencionar muchas aplicaciones de los bambúes aunque son pocas las que se pueden considerar como producciones industrializadas en el sector de la construcción específicamente.

La elaboración de andamiajes en la construcción de edificaciones en países orientales como China, India e Indonesia es bastante conocida; de esta aplicación se destacan sus bondades como material resistente ante la presencia de fuertes vientos y su uso no pierde actualidad.

Por otra parte, una aplicación arquitectónica tiene que ver con la elaboración de vivienda. Colombia tiene experiencia propia en este sentido, en particular se promovió su uso como material de reconstrucción de vivienda luego del terremoto del eje cafetero en el año 96.

Otro aspecto a destacar, es el uso del bambú como material para la elaboración de casetones en placas aligeradas, paneles estructurales para pisos, y en algunos casos como material de refuerzo para placas de concreto.

#### **1.4.1 MATERIALES COMPUESTOS DERIVADOS**

Las principales aplicaciones de los bambúes como material compuesto, se encuentran en la elaboración de paneles y tableros de fibras aglomeradas o de compuestos laminados; en ambos casos las principales aplicaciones tienen que ver con la construcción de vivienda, bien sea para divisiones o para pisos, pero se ha desarrollado poco en cuanto a las aplicaciones de tipo estructural.

Al respecto, Janssen (2002) llama a una de estas aplicaciones “plybamboo”, el cual consiste en un panel contrachapado elaborado con bambú que se produce a nivel artesanal en pequeñas aldeas en países orientales [18].

Por otra parte, se han llevado a cabo diversas investigaciones y propuestas sobre desarrollo de materiales encolados laminados de bambú para aplicaciones estructurales con diferentes nombres como plyboo, Lamboo y otros; debido a que son desarrollos desde la industria y en diversos lugares del mundo, no existe un consenso en cuanto a que nombre usar para este tipo de materiales, aunque todos ellos tienen en común el uso únicamente de adhesivos como interfase de los elementos laminados.

Según Qisheng (2001) los materiales compuestos derivados de los bambúes se pueden clasificar como:

- 1) *compuestos bambú-madera tipo sándwich*: es un panel de tres láminas, las dos exteriores de bambú encolado laminado y la central de madera, cuyo uso principal puede ser para embalaje.
- 2) *Compuestos bambú-madera contrachapados*: tableros de placas contrachapadas de madera con capas exteriores de bambú y sus aplicaciones pueden ser las mismas del anterior.
- 3) *Tablero de partículas de bambú reforzadas*: en este caso se usa el material en forma de astillas y se obtiene el producto mediante presión y calor para compactar el panel.

Otros productos se han desarrollado más recientemente, como por ejemplo los elementos prensados de tipo estructural, en donde para su fabricación se aprovecha todo el material se utiliza incluyendo las cortezas excepción de los internodos, los cuales son extraídos previamente.

#### **1.4.2 GUADUA LAMINADA ESTRUCTURAL**

Investigaciones llevadas a cabo por Stamm (2002), Barreto (2003), y Correal (2009), coinciden en las ventajas de llevar este material a nivel compuesto encolado laminado, dados los resultados de resistencia a diferentes tipos de esfuerzos.

Las propiedades mecánicas de este tipo de material compuesto obtenidas por López (2009) fueron:

- A compresión paralela a la fibra: 48 Mpa y 19137 Mpa de resistencia máxima y módulo de elasticidad respectivamente.
- A tracción longitudinal a la fibras: 132 Mpa y 17468 MPa de resistencia máxima y módulo de elasticidad respectivamente.
- A flexión: 74 MPa y 11456 MPa de resistencia máxima y módulo de elasticidad respectivamente.

Estos valores son similares a los mostrados de otros estudios realizados previamente sobre la GAK sin laminar, y en valores específicos como los módulos de elasticidad son mayores entre un 10% y 20% [19] [23].

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 MATERIAL BASE

La Guadua utilizada para esta investigación se adquirió a través de INDUGUADUA S.A., empresa ubicada en La Tebaida (Quindío), esta empresa es reconocida por seguir estándares de calidad para el corte, inmunización y secado de la GAK basados en las normas NTC 5300.

El material se obtuvo de diferentes cultivos seleccionados al azar por los proveedores y se separó en tres grupos según la altura de culmo en : cepas, basas y sobrebasas. Cada paquete constó de 7 tramos de 1 m aproximadamente cada uno para un total de 21 tramos; todos fueron debidamente etiquetados y tomados de especímenes diferentes para favorecer la independencia de los resultados.

Se solicitaron muestras maduras, esto es, de entre 3.5 y 4.5 años máximo, ya que es en este periodo de tiempo cuando la GAK alcanza su mejor desempeño mecánico [20].

En términos de secado, se solicitó que el material estuviera en un contenido de humedad de  $13 \pm 1\%$ . Los factores relacionados con el clima que pueden afectar las muestras son el cambio de altitud, temperatura y de humedad relativa del ambiente; para nuestro caso fueron:

|             | ALTITUD<br>(msnm) | TEMPERATURA<br>(promedio ultimo año) | HUMEDAD<br>RELATIVA<br>(promedio ultimo año) |
|-------------|-------------------|--------------------------------------|--|
| LA TEBAIDA  | 1187              | 22°C                                 | 70%  |
| BUCARAMANGA | 959               | 24°C                                 | 80%  |

Tabla 5. Cuadro comparativo de condiciones climáticas en La Tebaida ( Quindío) y Bucaramanga (Santander). Datos iniciales tomados de páginas oficiales de gobernaciones y alcaldías respectivas.

Con estos datos, según Montoya (2010) el contenido de humedad del material podría variar del 14% al 16% que sería su contenido de humedad de equilibrio;

este valor no afecta de manera significativa las propiedades mecánicas del material y no hace parte del análisis que se propone esta investigación, razón por la cual se considera como parametro fijo [21].

Para el traslado de muestras de GAK, se siguieron las sugerencias estipuladas en las normas NTC 5525, llevando a cabo este procedimiento en el menor tiempo posible y empacando en películas de polietileno el material con el fin de no afectar las condiciones iniciales del mismo.

## 2.2 CARACTERIZACION ÓPTICA

Para la determinación de la densidad aparente de fibras se utilizó microscopía óptica de campo amplio de tipo TIC (total interference contrast). Para lograr los mejores resultados fue necesario diseñar un protocolo especial para tal fin, el cual comprendió las siguientes etapas: 1) preparación de la probeta, 2) toma de micrografías y elaboración del mosaico, 3) tratamiento digital del mosaico o imagen unificada y 4) segmentación de la imagen y cálculo de áreas.

### 2.2.1 PREPARACION DE PROBETAS

La superficie de la GAK en las secciones transversales tiene una dureza Brinell que según Montoya (2007) varía entre los 21 y 45 HB, que se aproxima a los valores de dureza de algunos metales blandos como el aluminio y algunas aleaciones de cobre, ver Tabla 7 [21],[22].

| MATERIAL                         | DUREZA BRINELL<br>(HB) |
|----------------------------------|------------------------|
| Aluminio                         | 23                     |
| Aleaciones de Cobre              | 35                     |
| Guadua <i>Angustifolia Kunth</i> | 21- 45                 |

Tabla 6. Comparación de durezas de algunos metales blandos respecto a la GAK. Datos tomados de Montoya (2007) y Callister (2009).

De acuerdo a lo anterior, las probetas son susceptibles de ser tratadas como muestras metalográficas, siendo por esto preparadas siguiendo el mismo método

usado en muestras metálicas de baja dureza, el cual consta de lo siguientes pasos:

- *corte de la muestra*: las muestras se cortaron con un equipo de disco abrasivo (Figura 12).



Figura 12. Equipo de corte con disco abrasivo para muestras metalográficas.  
Fuente: autor.

- *montaje en resina termoestable*: debido el tamaño y forma de las muestras, fueron montadas en una base de resina poliéster endurecida con peróxido al 2% aproximadamente y separadas según la altura de culmo en: cepas, basas y sobrebasas (Figura 13).

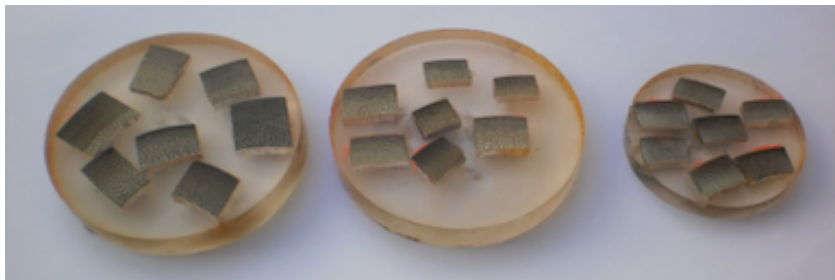


Figura 13. Montaje de muestras de GAK en resina poliéster. Fuente: Autor.

- *desbaste*: para el desbaste inicial se usaron papeles abrasivos de carburo de silicio en gramajes a partir de 80 hasta 220; luego para el desbaste fino se utilizaron gramajes de 400, 600 y 1200.

- *pulido*: para la etapa final del proceso se usó una máquina pulidora de velocidad variable con paños y partículas de alúmina de gramaje 0.05 micras (figura 14).



Figura 14. Equipo de desbaste y pulido de velocidad variable. Fuente: autor.

## 2.2.2 TOMA DE MICROGRAFÍAS

Para lograr una imagen de aproximadamente  $10 \text{ mm}^2$  de alta resolución, el uso de un campo amplio no es posible; si se toman imágenes a 200 aumentos de  $1200 \times 1080$  pixeles se observa como resultado un campo de  $4 \times 4 \text{ mm}$ , por eso para obtener una imagen de este tipo es necesario fusionar un mosaico compuesto por cerca de 100 imágenes.

Las muestras preparadas se llevaron al equipo de microscopía Carl Zeiss Axio Imager Z1 (Figura 15).

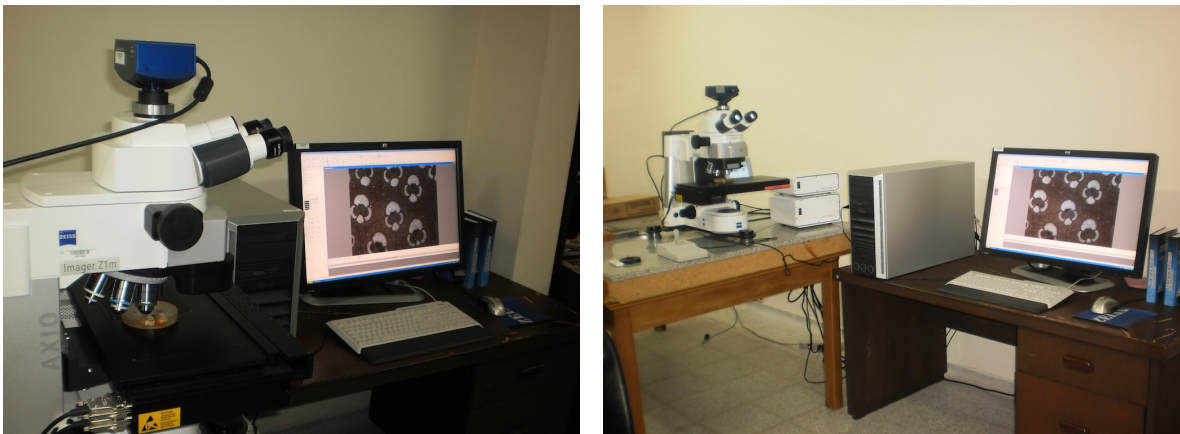


Figura 15. Microscopio óptico de campo amplio Carl Zeiss Axio Imager Z1. Fuente: Autor.

Cada probeta fue observada a través de un objetivo con aumento de 5X, luego se procedió a hacer la adquisición de la secuencia de imágenes de la sección transversal, procedimiento que el equipo hace de manera autónoma gracias a su plataforma de desplazamiento automático en los tres ejes.

El procedimiento utiliza un software llamado Axiovisión que controla la plataforma, objetivos y iluminación del microscopio que es programado para que tome la secuencia de imágenes.

Para la elaboración del mosaico se empalmaron las imágenes mediante una aplicación llamada autostitch 2.2 (Figura 16).

### 2.2.3 TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Luego de la elaboración del mosaico para cada muestra, estas quedaron con un tamaño de 68 a 212 megapíxeles, que fué reducido, según cada caso, con Matlab para facilitar el procesamiento digital.

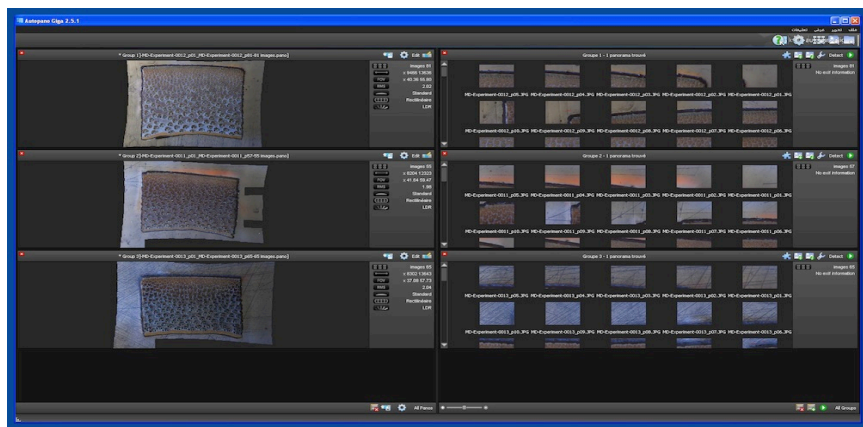


Figura 16. Elaboración de mosaicos con autostitch 2.2 . Fuente: Autor.

Posteriormente con otra aplicación llamada Image j se procedió a hacer la selección del área definitiva y su medición en píxeles. Área posteriormente convertida a  $\text{mm}^2$  para hacer los cálculos de densidad aparente de fibras.

Luego se procedió a separar cada imagen a color en sus tres canales (azul , rojo, verde), escogiendo el de mejor contraste, que para este caso fué el azul. A partir de éste se procedió a hacer un filtro para eliminar ruido en las imágenes (Figura 17).

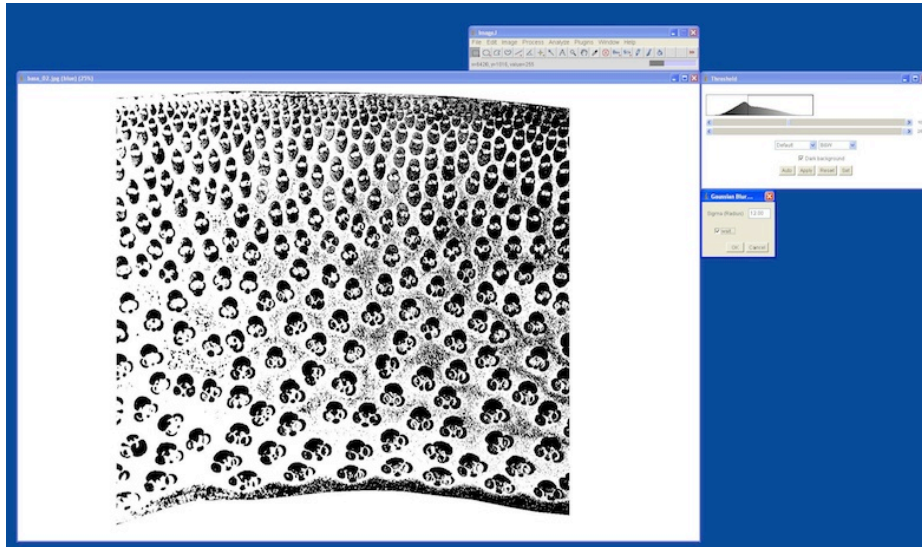


Figura 17. Tratamiento digital y mejoramiento de contraste en la imagen. Fuente : Autor.

## 2.2.4 SEGMENTACION DE IMÁGENES Y CALCULO DE AREAS

La etapa final del proceso se llevó a cabo utilizando Matlab. En primer lugar se estableció la diferenciación de los tipos de áreas a extraerse de la muestra y luego se procedió a su segmentación.

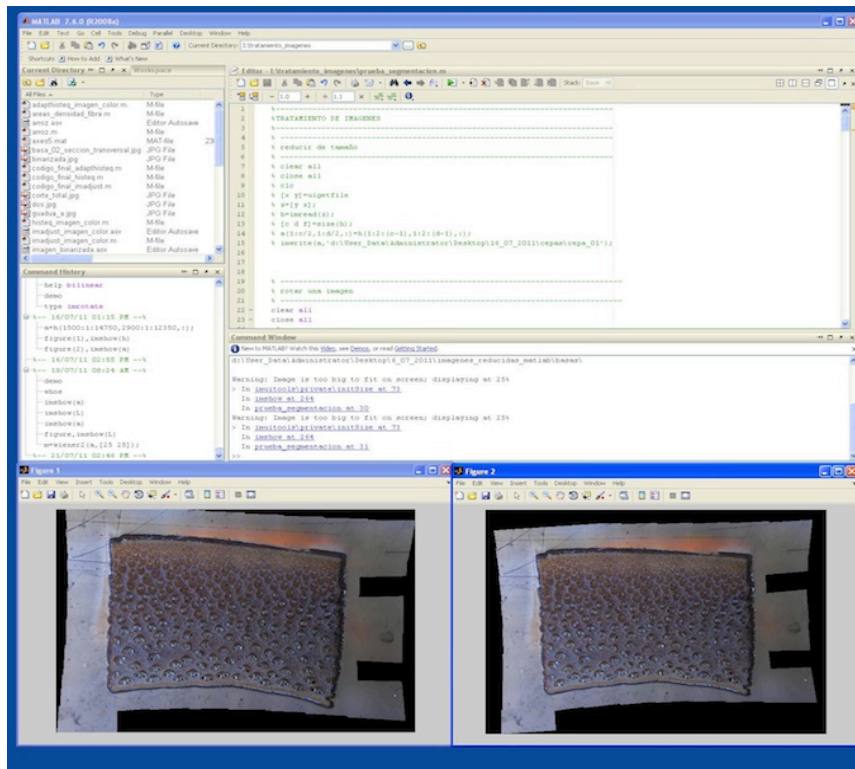


Figura 18. Segmentación y binarización de imágenes con Matlab. Fuente: Autor.

Finalmente se calculó el área total de cada muestra y el área ocupada por fibras, así como su variación radial entre las zonas interior y exterior. (Figura 18).

### 2.3 CARACTERIZACION MECÁNICA

El comportamiento mecánico de la guadua se analizó ante tres tipos de solicitaciones: compresión longitudinal, flexión y tracción longitudinal. El propósito de hacer varios tipos de ensayos fué analizar cuál de ellos es el que mejor se desempeña para ser relacionado con los valores de densidad aparente investigados. Para cada tipo de sollicitación se ensayaron 21 probetas, reparidas según la altura de sección.

De acuerdo a lo anterior, la extracción del material utilizado para la elaboración de las probetas se llevó a cabo como indica la Figura 19.

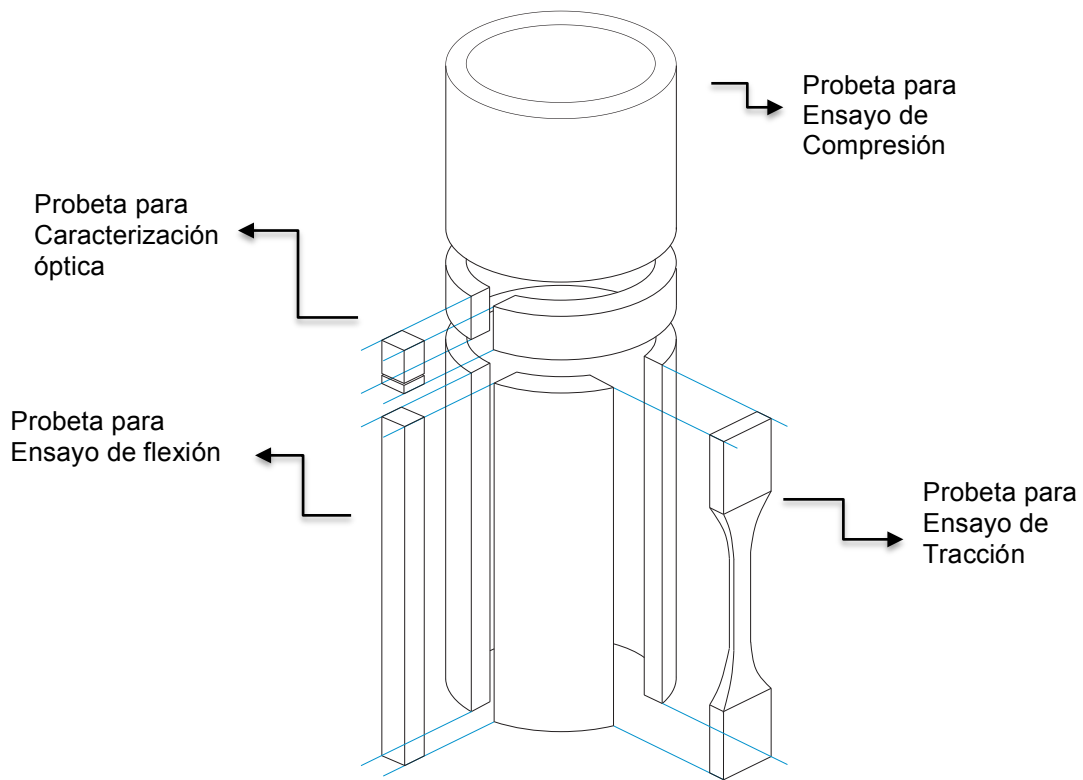


Figura 19. Esquema general de extracción de las probetas para ensayos mecánicos de GAK. Fuente: autor.

### 2.3.1 EQUIPOS Y PROTOCOLOS

#### ***Ensayo de compresión paralela a la fibra***

Como se mencionó anteriormente, para realizar estas pruebas se siguió el protocolo estipulado en la NORMA NTC 5525. Las dimensiones de las probetas para los ensayos de compresión según esta norma, especifica que la altura sea la misma del diámetro exterior (figura 20) [22].

Para la realización de los ensayos se decidió que todas las probetas estuvieran libres de defectos como nudos o agrietamientos importantes que fueran visibles o que atravesaran la pared del cilindro en su totalidad.

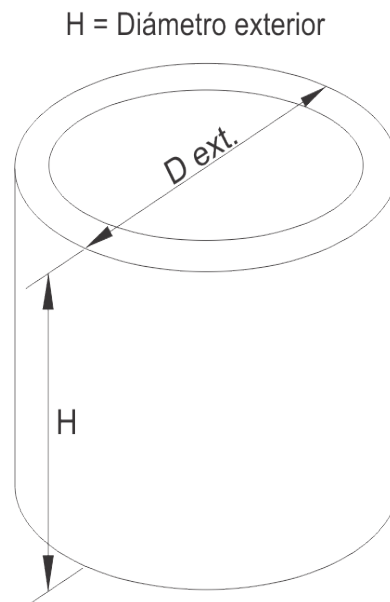


Figura 20. Esquema de probeta para ensayo de compresión. Fuente: Autor.

Para la prueba, se utilizó una máquina universal de ensayos Multitest System MTS 50, con capacidad de carga de hasta 50 toneladas; de acuerdo a la norma, la velocidad de la realización de la prueba fue de 0.01 mm/seg con una precarga de 1 Kn. Según las pruebas preliminares los valores de carga máxima esperada fueron entre 13000 y 19000 kg/f (Figura 21).



Figura 21. Equipo universal de ensayos Multitest System MTS 50. Fuente: Autor.

Aunque no se utilizaron platos hemisféricos como es lo recomendado, cada probeta antes de ensayarse fue refrentada en sus dos caras con un plato abrasivo para asegurar la uniformidad en la distribución de la carga (Figura 22).



Figura 22. Izquierda: Probeta de compresión longitudinal acoplada al equipo de ensayos. Derecha: ajuste de cara transversal mediante disco abrasivo. Fuente:

### ***Calculo y expresión de los resultados***

El Esfuerzo último de compresión se determinó con la siguiente formula:

$$\sigma_{ult} = F_{ult}/A \quad (1)$$

en donde

$\sigma_{ult}$  es el esfuerzo último de compresión en Mpa

$F_{ult}$  es la carga máxima a la cual falla la probeta

$A$  es el área de sección transversal

por otra parte, la deformación unitaria se calculó así:

$$\epsilon_{unit.} = \Delta_h / H_o \quad (2)$$

en donde

$\epsilon_{unit.}$  es la deformación unitaria ( adimensional)

$\Delta_h$  es la longitud del cambio dimensional medido en mm.

$H_o$  es la altura inicial de la probeta medido en mm.

El módulo de elasticidad se calculó a partir del valor medio de las lecturas tomadas como una relación lineal entre esfuerzos y deformaciones. Los rangos sugeridos por la norma para dichas lecturas están entre 10% y 60% del esfuerzo máximo (  $\sigma_{ult}$ ); sin embargo, en los ensayos preliminares realizados, la zona de proporcionalidad directa se ubicó con mayor precisión entre el 20% y 60%.

El modulo de elasticidad se calculó con la siguiente expresión:

$$MOE = \frac{\sigma_{60\%} - \sigma_{20\%}}{\epsilon_{60\%} - \epsilon_{20\%}} \quad (3)$$

en donde

$\sigma_{70\%}$  es el esfuerzo al 60% del esfuerzo máximo

$\sigma_{20\%}$  es el esfuerzo al 20% del esfuerzo máximo

$\epsilon_{70\%}$  es la deformación al 60% del esfuerzo máximo

$\epsilon_{20\%}$  es la deformación al 20% del esfuerzo máximo

### ***Ensayo de flexión***

Existen varias normas que se pueden utilizar para determinar las propiedades mecánicas a flexión de las maderas o recursos maderables en general y varias de estas se han adaptado para usarse en las diferentes especies de Bambúes.

Concretamente, para la GAK se han realizado ensayos de flexión con cuatro puntos en tramos de aproximadamente 1.80 m de largo utilizando la sección transversal completa (de forma circular); sin embargo, como los propósitos de esta investigación en particular son determinar dichas propiedades en secciones pequeñas, componentes de materiales compuestos encolados laminados de tipo estructural, se consideró fundamental trabajar con una probeta, cuya sección sea extraída de la sección circular completa (Figura 23).

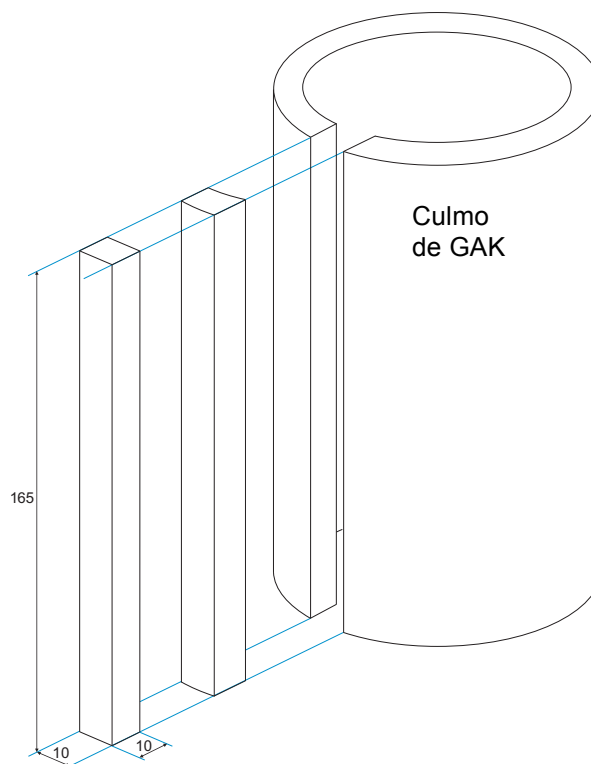


Figura 23. Esquema de extracción de las probetas para ensayos de flexión. Dimensiones en mm. Fuente: Autor.

Tanto la norma ASTM D-143 como la DIN 52-186 proponen para ensayos de flexión en tres puntos, que la distancia entre los apoyos sea aproximadamente 14

a 16 veces el ancho de la sección (siendo esta cuadrada); sin embargo, la norma alemana contempla el uso de secciones de menor área que las normas americanas, las cuales plantean como área mínima  $25 \text{ mm}^2$  [23] , [24].

De acuerdo a las pruebas preliminares realizadas se concluyó que la cara que debía soportar la aplicación de la carga debía ser la de mayor densidad, esto es la cara tangencial exterior de la muestra, ya que debido a su mayor dureza, presentaba menos reducciones dimensionales en la sección transversal de la muestra y en consecuencia los resultados son más confiables. (Figura 24,25).

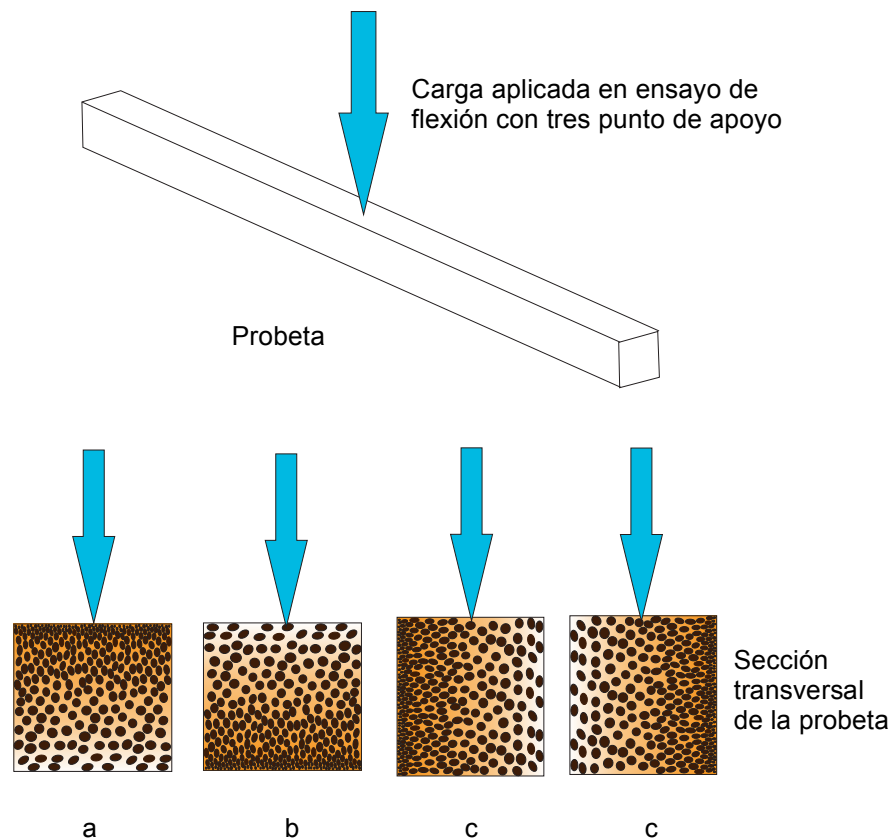


Figura 24. Posibilidades de dirección de aplicación de la carga en ensayos de flexión para probetas pequeñas de GAK; a) sobre la cara exterior, b) sobre la cara interior, c) sobre la cara radial. Fuente: Autor.

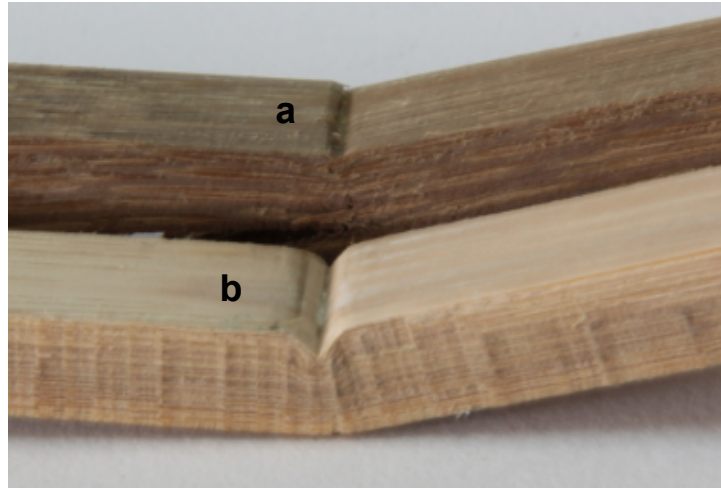


Figura 25. Deformaciones en la zona de aplicación de la carga en ensayos de flexión sobre probetas pequeñas de GAK; a) cara exterior, b) cara interior. Fuente: Autor.

Para realizar las pruebas se utilizó una máquina de ensayos universal TINIUS OLSEN modelo H25KS con un celda de carga de 25 Kn (Figura 26). La velocidad del ensayo fué de 1,3 mm/min y la deflexión máxima esperada de 25 mm.

En ensayos preliminares se encontró que la deflexión de la probeta superó los valores proyectados; sin embargo, esta no mostraba una fractura en total de la sección, sino pequeñas fallas a manera de capas, por lo que el ensayo debió detenerse después de un tiempo de alcanzar el valor máximo de esfuerzo o de que los valores de esfuerzo regresaran al 10% de dicho valor.

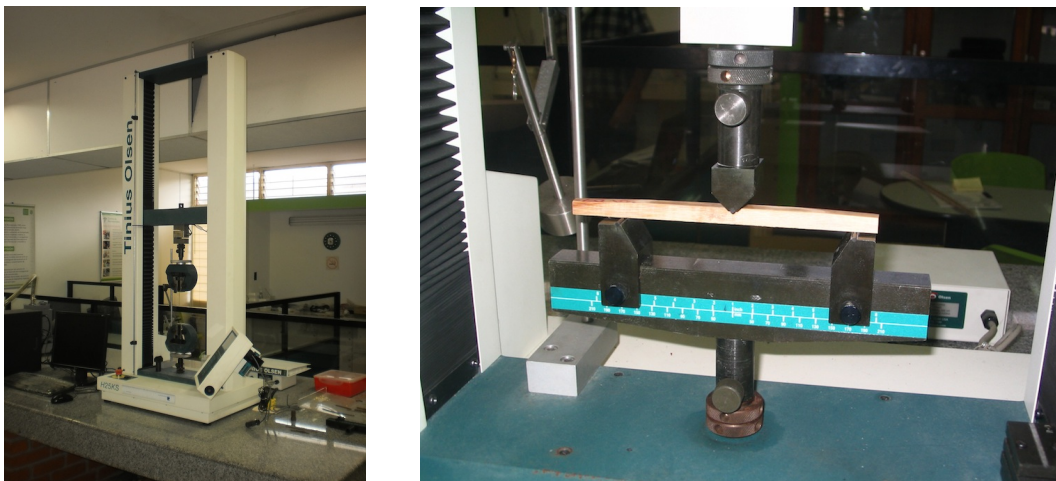


Figura 26. Máquina de ensayos universal Tinius Olsen H25KS. Fuente: Autor

### **Calculo y expresión de los resultados**

Para determinar los valores de las esfuerzos, deformaciones y las propiedades mecánicas a partir de estos, se utilizó QMAT profesional, software con que el equipo de ensayos hace todos los cálculos.

El Esfuerzo de flexión se determinó con la siguiente expresión:

$$\sigma_f = 3FL/2bd^2 \quad (4)$$

en donde

$\sigma_f$  es el esfuerzo de flexión en Mpa

$F$  es la carga aplicada sobre la probeta

$L$  es la longitud entre los apoyos, en este caso es un valor constante de 144 mm

$b$  es la altura de la sección transversal

$d$  es el ancho de la sección transversal

La anterior ecuación se utiliza para calcular esfuerzos de flexión cuando la sección transversal es rectangular.

por otra parte, la deformación Unitaria se calculó así:

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

en donde

$\varepsilon_f$  es la deformación unitaria

$D$  es la deflexión medida por el equipo

$d$  es al ancho de la sección transversal

$L$  es la longitud entre los apoyos

### **Ensayo de Tracción paralela a la fibra**

Para la realización de los ensayos de tracción paralela a la fibra se siguió nuevamente la norma NTC 5525. Para dirigir la fractura de la probeta hacia la zona débil, ésta se debe elaborar con un nudo o diagrama sobre la zona de falla.

Sin embargo, en ensayos preliminares se observó que aunque la probeta falla por la zona débil, en probetas que no tienen nudos en esa zona, los niveles de resistencia se incrementan considerablemente, por cuanto se hizo el área de sección transversal de la zona débil aun menor reduciendo tanto el espesor como el ancho de la misma para incrementar los valores de resistencia (Figura 27).

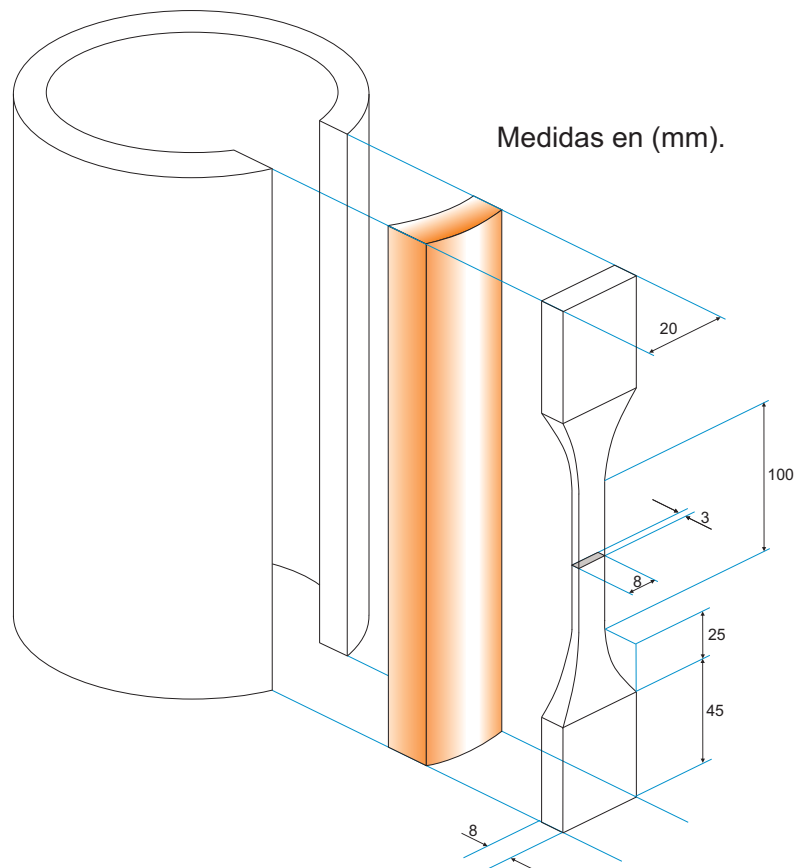


Figura 27. Esquema de extracción y geometría de las probetas para los ensayos de tracción. Fuente: Autor.

### **Cálculo y expresión de los resultados**

El Esfuerzo de tracción paralela a la fibra se determinó con la siguiente formula:

$$\sigma_t = F_t/A \quad (6)$$

en donde

$\sigma_t$  es el esfuerzo de tracción en Mpa

$F_t$  es la carga aplicada a la probeta

$A$  es el área de sección transversal en  $\text{mm}^2$

por otra parte, la deformación Unitaria se calculó así:

$$\epsilon_{unit.} = \Delta_l / L_o \quad (7)$$

en donde

$\epsilon_{unit.}$  es la deformación unitaria ( adimensional)

$\Delta_l$  es la longitud del cambio dimensional medido en mm.

$L_o$  es la longitud inicial de la zona débil de la probeta medido en mm.

El módulo de elasticidad se calculó con la siguiente expresión:

$$MOE = \frac{\sigma_{60\%} - \sigma_{10\%}}{\epsilon_{60\%} - \epsilon_{10\%}} \quad (8)$$

en donde

$\sigma_{60\%}$  es el esfuerzo al 70% del esfuerzo máximo

$\sigma_{10\%}$  es el esfuerzo al 20% del esfuerzo máximo

$\epsilon_{60\%}$  es la deformación al 70% del esfuerzo máximo

$\epsilon_{10\%}$  es la deformación al 20% del esfuerzo máximo

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### 3.1 DIAMETRO EXTERIOR Y ESPESOR

En la caracterización de la GAK las variables dimensionales de mayor importancia son el diámetro exterior y el espesor, ya que de estas depende la aplicación que se le va a dar al tramo seleccionado.

En términos generales, los elementos de diámetros mayores a 11 cm y espesores mayores de 12 mm se aplican principalmente en elementos sometidos a compresión y las secciones con diámetros pequeños (menores a  $9 \pm 1$  cm) y espesores hasta de  $10 \pm 1$  mm se utilizan para vigas o refuerzos diagonales [25].

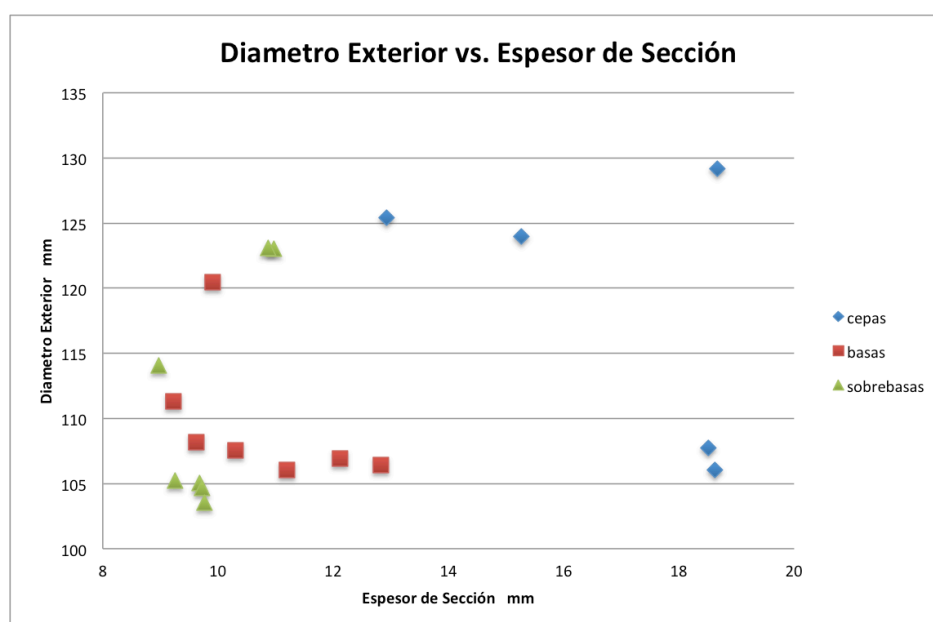


Figura 28. Comportamiento de Diámetro Exterior vs. Espesor de sección en muestras de GAK. Fuente: Autor.

En los datos obtenidos de las muestras se observó en general que a medida que aumenta el diámetro exterior de las secciones, también aumenta su espesor, esto confirma que las secciones de mayor espesor se encuentran en los primeros internodos del culmo, es decir en las cepas (figura 28).

Sin embargo, vale la pena anotar que se encontraron secciones de espesores importantes en muestras con diámetros exteriores relativamente bajos, esta circunstancia es posible, debido a la gran variación dimensional que se puede presentar en la GAK entre especímenes de diferentes cultivos, bien sean de zonas distintas, diferentes condiciones de altitud y humedad o por la composición misma del suelo donde se siembran (Londoño 2004) [26].

Por otra parte, también se observaron muestras de sobrebasas con diámetros exteriores cercanos a los 12 cm, magnitud mas acorde con las Cepas; Sin embargo los espesores fueron bajos, confirmando su tipología como Sobrebasas, esto puede suceder también debido a que dependiendo del lugar de procedencia de los especímenes y de otros factores relacionados con el cultivo, además de la variedad específica como por ejemplo macana, cebolla o castilla, es posible encontrar culmos de alturas que pueden variar entre los 8 m a 24 m (González y Díaz , 1992), con lo cual puede darse que una sección de sobrebasa de un culmo de gran altura coincida en el diámetro exterior con una cepa convencional, aunque van a diferir en sus espesores de sección [27].

### 3.2 DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS

Los valores de densidad aparente obtenidos se muestran inicialmente como la sumatoria de las áreas ocupadas por las fibras dividida en el área total de cada sección observada. La sección transversal de la GAK disminuye con la altura y el espesor del culmo, que en este caso fue tomada entre 100 y 180 mm<sup>2</sup> para la determinación de la densidad aparente.

Esta área varía para cada sección porque el espesor varía según la altura del culmo, de tal manera que para una muestra de 10 mm de ancho a nivel radial, el área total será mayor en una cepa que en una basa o sobrebasa; lo anterior no afecta los resultados ya que la densidad aparente es un valor adimensional proporcional para cada muestra.

En las mediciones se encontró que los valores de densidad aparente de fibras medidos entre los diámetros exterior e interior de una determinada sección se mantienen constantes aun si la sección que se toma como base para dicha medición no es constante (figura 29).

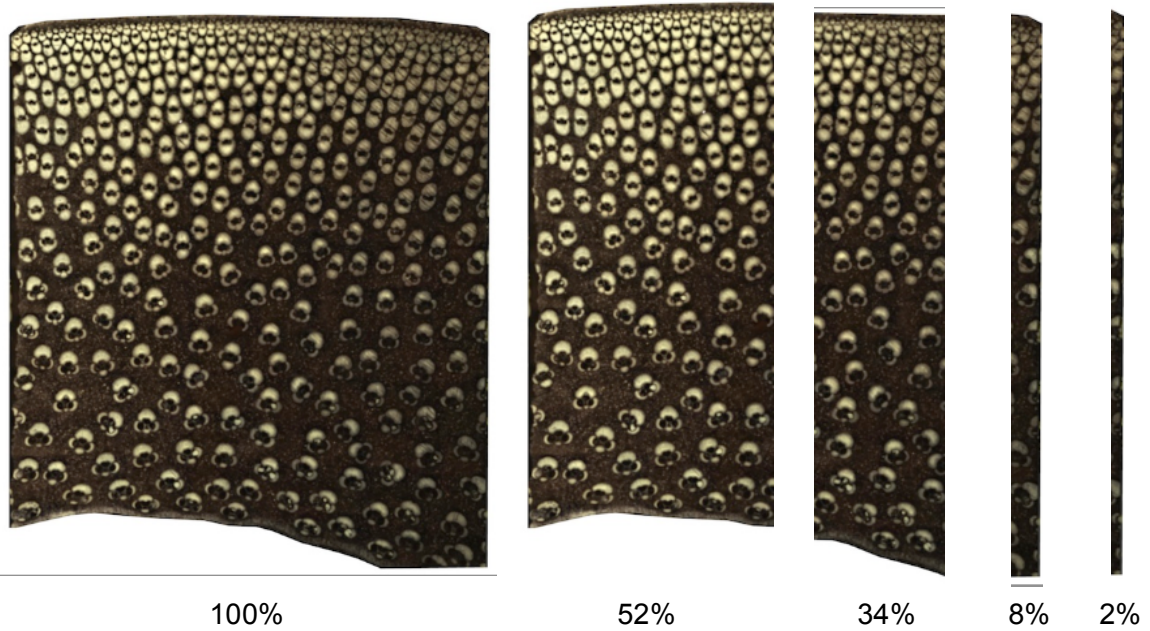


Figura 29. Variaciones de sección medida para determinar densidad aparente de fibras de GAK. Fuente: Autor.

Los datos de las densidades aparentes obtenidas para cinco diferentes secciones observadas de un mismo tipo de muestra (cepa) obtuvieron variaciones mínimas entre 0,30 y 0,32; lo cual confirma que la cantidad de fibras presentes en la dirección radial de GAK entre los diámetros interior y exterior es directamente proporcional al área de sección analizada, y que la proporción de la cantidad de dichas fibras permanece constante. (Tabla 7).

| Muestra   |      | área de muestra en pixeles | área de fibras en muestra | densidad aparente |
|-----------|------|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| CEPA<br>2 | 100% | 31373972                   | 10094264                  | 0,32              |
|           | 52%  | 16606762                   | 5058300                   | 0,30              |
|           | 34%  | 10850621                   | 3227600                   | 0,30              |
|           | 8%   | 2771751                    | 853340                    | 0,31              |
|           | 2%   | 806309                     | 260100                    | 0,32              |

Tabla 7. Comparación de densidades aparentes en diferentes tamaños de área de una misma muestra de Cepa.

A continuación se presentan los resultados separados por los tres rangos principales de alturas:

### 3.2.1 Densidad Aparente de fibras en Cepas

Los valores de densidades aparentes de fibras para las cepas se ubicaron entre los 0,322 y 0,413 como se observa en la Tabla 8. Por otra parte, los espesores para estas secciones se ubicaron entre los 12,9 y 18,67 mm. Relacionando gráficamente los valores obtenidos se obtiene una relación con tendencia lineal entre estas dos variables (Figura 30).

| CEPAS    | área de sección observada cm <sup>2</sup> | espesor mm  | Diámetro exterior mm | Relación Radio ext./espesor | densidad aparente de fibras |
|----------|---|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1        | 2,12                                      | 16,18       | 107,74               | 3,33                        | 0,322                       |
| 2        | 1,89                                      | 12,9        | 106,04               | 4,11                        | 0,413                       |
| 3        | 1,68                                      | 15,43       | 125,39               | 4,06                        | 0,338                       |
| 4        | 1,99                                      | 14,83       | 123,95               | 4,18                        | 0,401                       |
| 5        | 1,73                                      | 18,67       | 129,15               | 3,46                        | 0,328                       |
| promedio | 1,88                                      | 15,60± 1,18 | 118,45± 3,25         | 3,83± 0,54                  | 0,36± 0,16                  |

Tabla 8. Valores de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de cepas de GAK. Fuente: Autor.

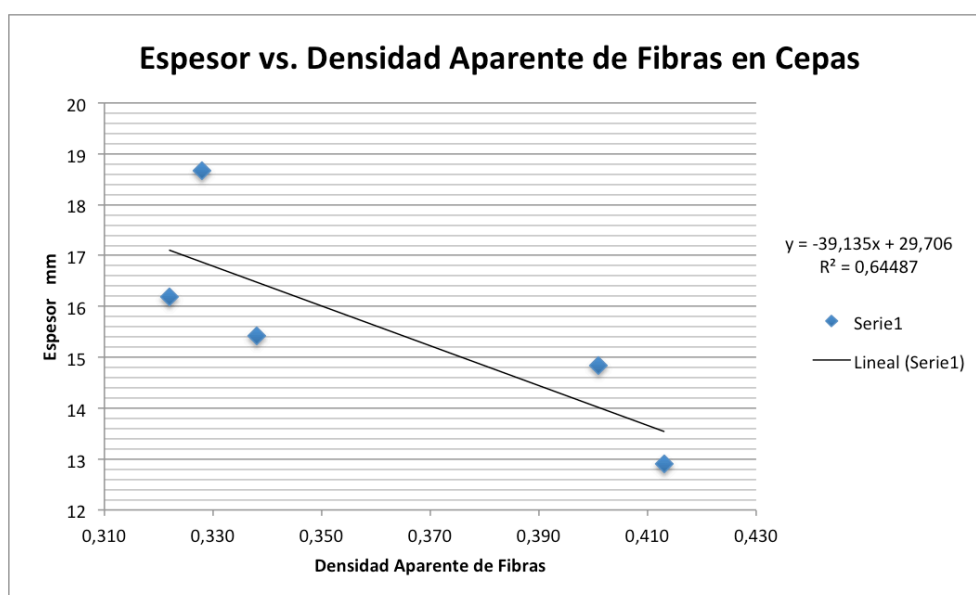


Figura 30. Densidad aparente de fibras vs. Espesor de sección en muestras de cepas de GAK. Fuente: Autor.

Por otra parte, los diámetros exteriores se ubicaron entre los 10,6 y 12,9 cm; aunque se encontraron dos muestras con diámetros relativamente bajos, sus

espesores fueron consistentes con la morfología de las cepas; sin embargo, no se encontró una relación con tendencia lineal marcada entre estas variables. (Figura 31).

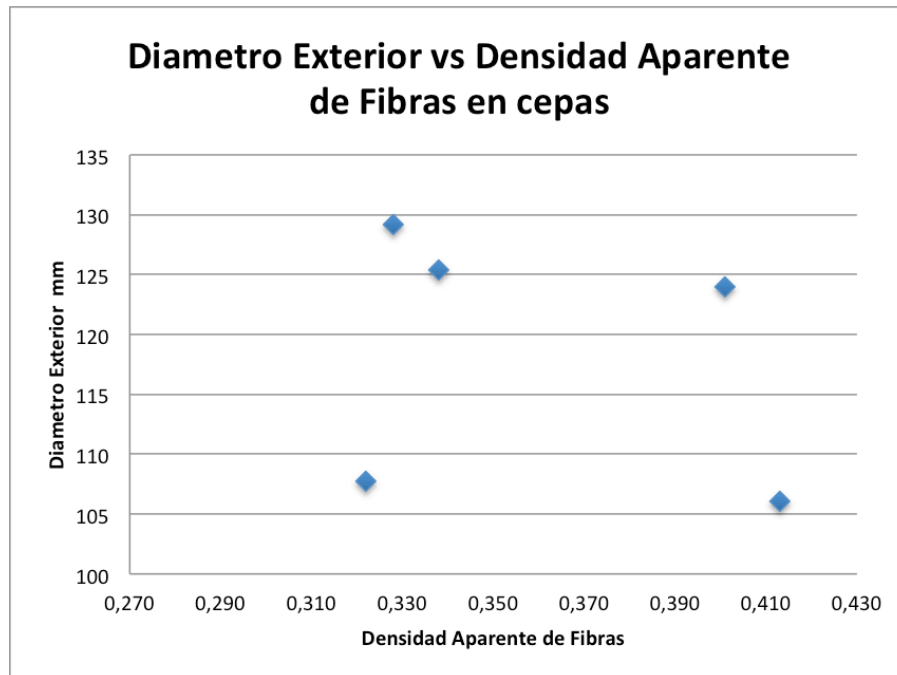


Figura 31. Densidad aparente de fibras vs. Diámetro exterior en muestras de cepas de GAK. Fuente: Autor.

Así mismo, los valores de la relación radio exterior/espesor, se encontraron entre los 3,33 y 4,18; en otras palabras, para las cepas el diámetro exterior fue aproximadamente 3,83 veces el espesor de la sección en promedio.

### 3.2.2 **Densidad Aparente de fibras en Basas**

En las muestras de Basas, los valores de densidades aparentes de fibras se ubicaron entre los 0,250 y 0,517 (Tabla 9).

Los espesores para estas secciones se variaron entre los 10,92 y 12,92 mm; en la figura 30 se relacionan los diferentes valores de espesores con la densidad aparente de fibras.

| BASAS    | área de sección observada cm <sup>2</sup> | espesor mm  | diámetro exterior mm | relación Radio ext./espesor | densidad aparente de fibras |
|----------|---|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1        | 1,37                                      | 12,92       | 115,43               | 4,15                        | 0,25                        |
| 2        | 0,92                                      | 11,24       | 108,19               | 5,62                        | 0,517                       |
| 3        | 1,15                                      | 11,19       | 106,06               | 4,74                        | 0,367                       |
| 4        | 1,34                                      | 11,50       | 106,89               | 4,41                        | 0,44                        |
| 5        | 1,12                                      | 10,92       | 120,47               | 5,52                        | 0,485                       |
| promedio | 1,18                                      | 11,55± 1,02 | 111,4± 3,16          | 4,89± 0,66                  | 0,41± 0,19                  |

Tabla 9. Valores de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de Basas de GAK. Fuente: Autor.

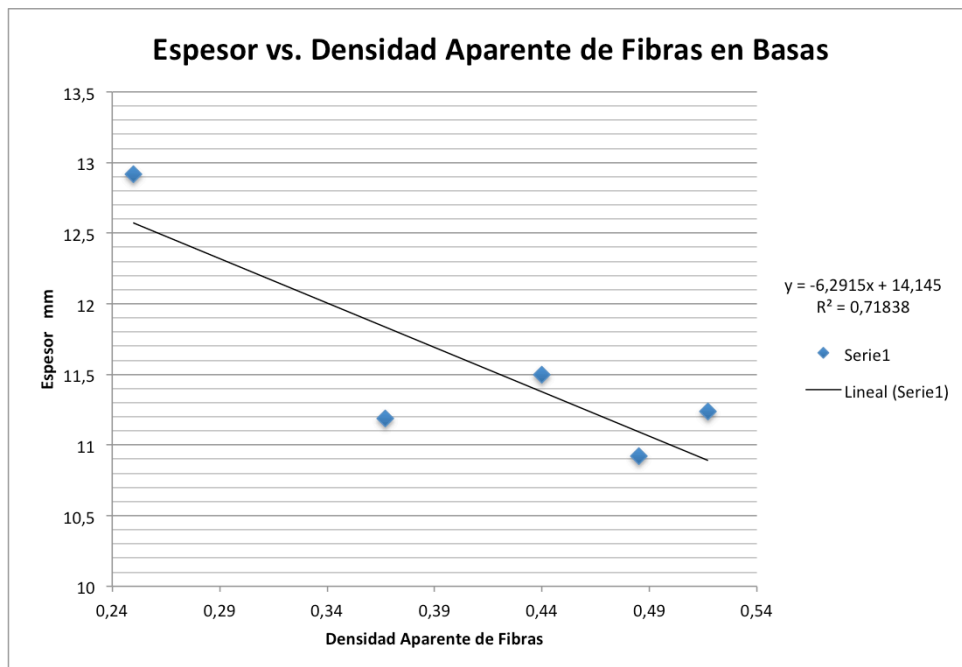


Figura 32. Relación entre el espesor de sección transversal y la Densidad aparente de Fibras para muestras de Basas de GAK.

Por otra parte, los diámetros exteriores se ubicaron entre los 10,6 y 12,04 cm; al relacionar esta magnitud con la densidad aparente de fibras no se encontró una relación proporcional directa o inversa marcada entre las variables (figura 33).

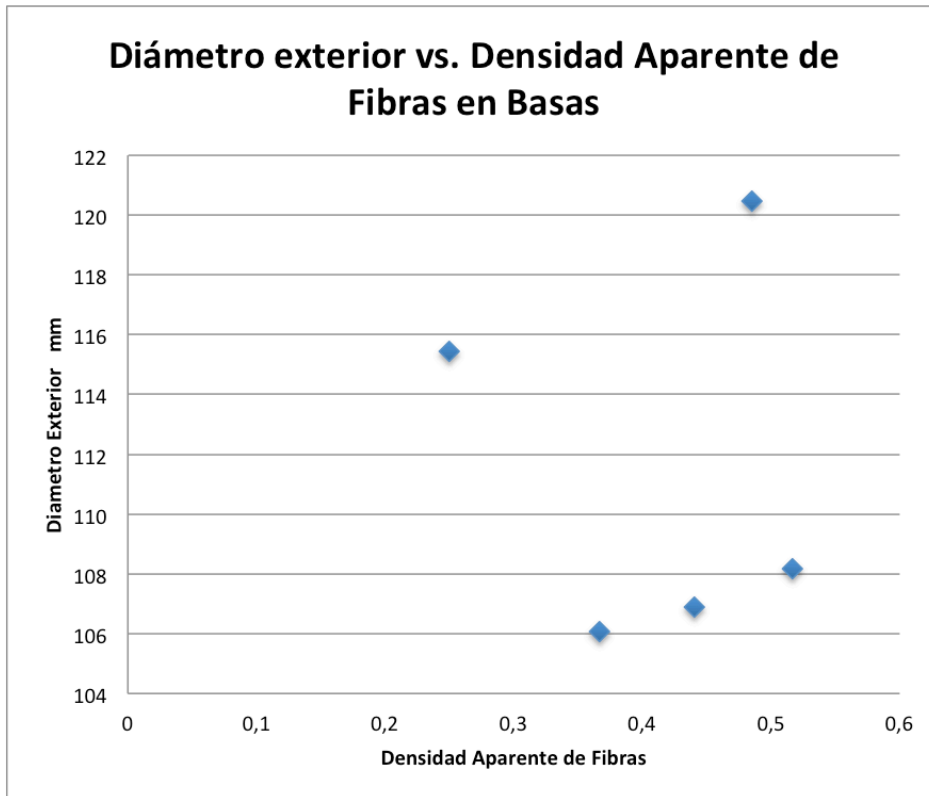


Figura 33. Relación entre el Diámetro exterior de sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Basas.

Finalmente, en la relación radio exterior/ espesor, los valores máximo y mínimo fueron de 5,62 y 4,15 respectivamente, con un promedio de 4,89; es decir, en las Basas el radio exterior fué de 5 veces el espesor aproximadamente.

### 3.2.3 *Densidad Aparente de fibras en Sobrebasas*

Las secciones tomadas de Sobrebasas muestran valores de densidades aparentes de fibras entre los 0,392 y 0,490; a pesar que el valor más alto de densidad aparente de fibras fué encontrado en una basa y no en una sobrebasa, como indicaría la lógica del comportamiento de este material, el valor promedio en las sobrebasas (0,423) si estuvo por encima de este promedio en basas (0,412) (Tabla 10).

Los valores de espesores se ubicaron entre 9,68 y 11,24 mm y los diámetros exteriores entre 10,46 y 12,30 cm; los anteriores valores y principalmente sus

promedios mostraron un leve descenso en comparación con la altura de culmo anterior (basa) (Tabla 12).

| SOBREBASAS | área de sección observada cm <sup>2</sup> | espesor mm  | diámetro exterior mm | relación Radio ext./espesor | densidad aparente de fibras |
|------------|---|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1          | 0,93                                      | 10,98       | 114,06               | 6,36                        | 0,414                       |
| 2          | 0,92                                      | 9,68        | 105,02               | 5,42                        | 0,490                       |
| 3          | 1,04                                      | 10,96       | 105,25               | 5,68                        | 0,405                       |
| 4          | 0,98                                      | 11,24       | 104,67               | 5,38                        | 0,415                       |
| 5          | 1,37                                      | 10,87       | 123,07               | 5,66                        | 0,392                       |
| Promedio   | 1,05                                      | 10,75± 0,98 | 110,4± 3,14          | 5,70± 0,71                  | 0,42± 0,19                  |

Tabla 10. Valores de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de Sobrebasas de GAK. Fuente: Autor.

Finalmente, la relación radio exterior/espesor para este tipo de muestras presentó valores entre los 5,38 y 6,36, indicando, que en las Sobrebasas el radio exterior es en promedio 5,7 veces el espesor de la sección aproximadamente.

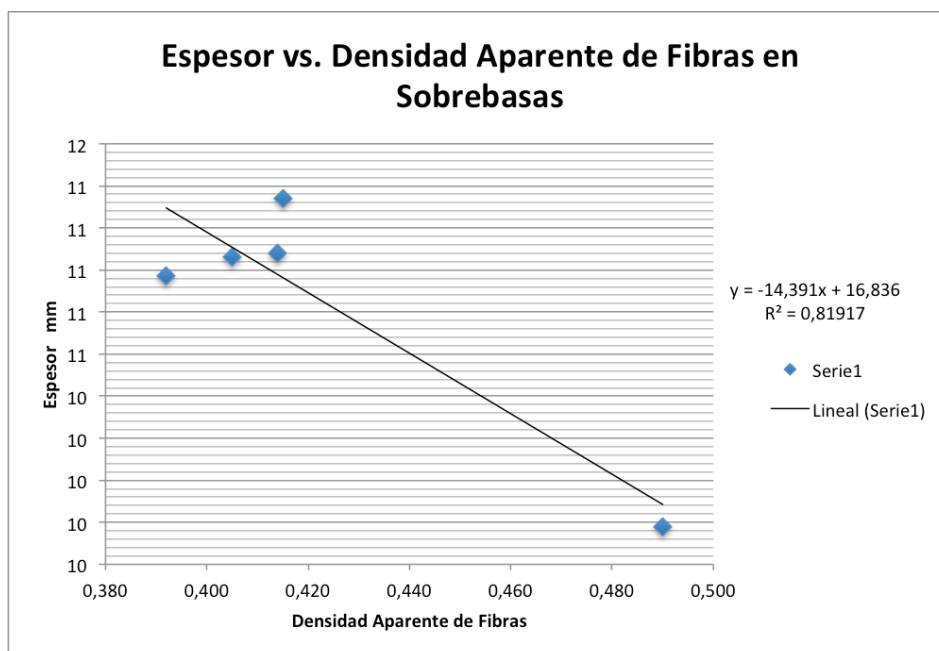


Figura 34. Relación entre el espesor de sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Sobrebasas.

En la relación entre espesor respecto a la densidad aparente de fibras en las sobrebasas analizadas, se observó un comportamiento directamente proporcional entre las variables, así como en las secciones anteriores (cepas y basas) (Figura 34).

De la misma manera, el comportamiento del diámetro exterior respecto a la densidad aparente de fibras reflejó una tendencia proporcional, aunque marcada ligeramente (Figura 35).

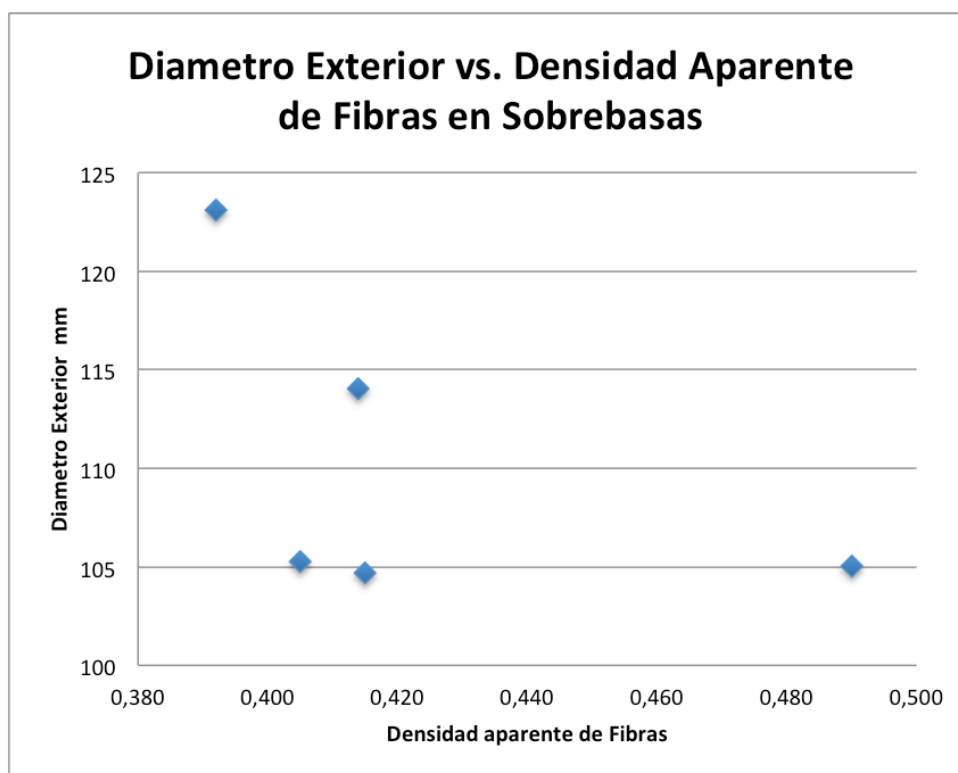


Figura 35. Relación entre el Diámetro exterior de la sección transversal y la densidad aparente de fibras en secciones de Sobrebasas. Fuente: Autor

Finalmente, en el resumen de la tabla 11 se muestran los valores promedio encontrados. Se puede notar un comportamiento coherente con lo reportado en la bibliografía consultada, en cuanto a la variación dimensional de la sección transversal de GAK y la presencia en ella de haces vasculares, que son ocupados mayormente por las fibras. Se observa que los espesores y diámetros exteriores disminuyen con la altura, mientras que la relación radio exterior/espesor y la densidad aparente de fibras aumentan en este mismo sentido.

El porcentaje máximo promedio de densidad aparente de fibras encontrado fué de 42%, valor ajustado a lo expresado por Londoño (2002), quien al respecto afirmó que la presencia de estas fibras en porcentaje podría estar entre 40% y 50% del total de la sección transversal del culmo [4].

|            | Área de sección observada cm <sup>2</sup> | espesor mm  | diámetro exterior mm | relación Radio ext./espesor | densidad aparente de fibras |
|------------|---|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CEPAS      | 1,88                                      | 15,60± 1,18 | 118,4± 3,25          | 3,83± 0,54                  | 0,36± 0,16                  |
| BASAS      | 1,18                                      | 11,55± 1,02 | 111,4± 3,16          | 4,89± 0,66                  | 0,41± 0,19                  |
| SOBREBASAS | 1,05                                      | 10,75± 0,98 | 110,4± 3,14          | 5,70± 0,71                  | 0,42± 0,19                  |

Tabla 11. Valores totales promedio de espesores, diámetro exterior y densidad aparente de fibras para muestras de GAK. Fuente: Autor.

### 3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

El comportamiento mecánico de la GAK fué determinado mediante ensayos de flexión, compresión y tracción longitudinales; en estas pruebas se determinó el modulo de elasticidad y la resistencia máxima ante cada sollicitación como valores de análisis y cálculo de relaciones entre las variables mecánicas y físicas tratadas en el numeral anterior.

#### 3.3.1 COMPORTAMIENTO ANTE SOLICITACIONES DE COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

Los valores de resistencia máxima ante esfuerzos de compresión se encontraron entre 32,6 y 42,3 Mpa. Dada la diferencia entre estos valores y para mostrar la tendencia del comportamiento mecánico, se presentan separados según la altura del culmo de donde se extrajo la muestra.

##### 3.3.1.1 *Resistencia a sollicitaciones de compresión en Cepas*

Las cepas corresponden a los tramos ubicados en los primeros 4 metros de altura del total del culmo (Londoño, 2002). En esos tramos se observan los mayores

diámetros exteriores y espesores, obteniéndose por ello, los valores de carga soportada a compresión, sin embargo, al calcular los valores de esfuerzos, estos resultaron en promedio los mas bajos de las muestras ensayadas (figura 36).

En la curva esfuerzo-deformación se observa, que antes del 10 % de la deformación total de la probeta, no se presenta un comportamiento proporcional a los esfuerzos, que puede atribuirse a un proceso de acomodación de las caras transversales hasta que se logra la distribución 100% uniforme de la carga.

Una vez acomodadas las caras transversales, se produce un comportamiento proporcional entre los esfuerzos y las deformaciones hasta valores cercanos al 80% del esfuerzo total resistido por la probeta, enseguida se visualiza un comportamiento no lineal entre esfuerzos y deformaciones hasta el esfuerzo máximo. Finalmente el material inicia con un comportamiento de reducción de esfuerzos acelerado hasta el momento de la falla.

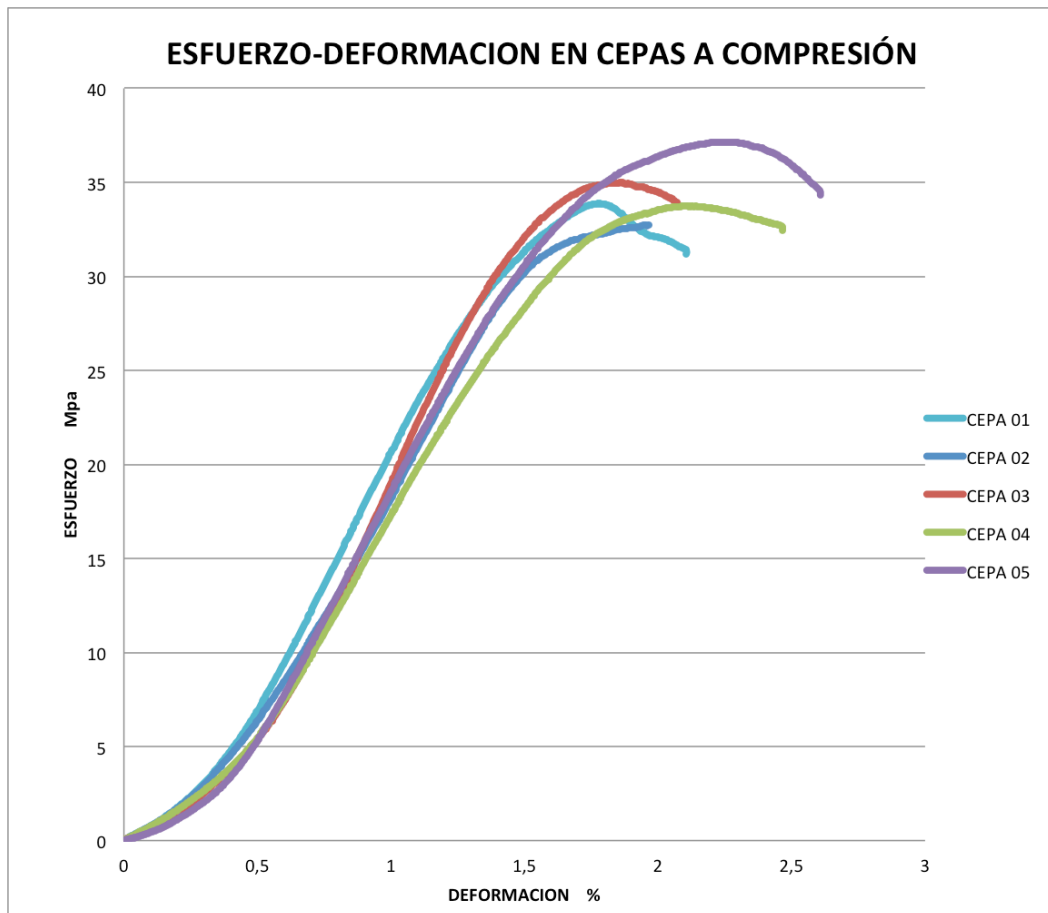


Figura 36. Curva esfuerzo-deformación en muestras de cepa de GAK sometidas a compresión. Fuente: Autor.

Se encontró que los valores máximos de esfuerzos para las muestras ensayadas se ubicaron entre los 32,6 y 37,14 MPa; estos valores son similares a los encontrados por González (2007) y González et. Al. (2008) en los esfuerzos promedio para la misma altura de sección, los cuales fueron de 29 MPa y 24 MPa respectivamente [10,11]. Se encontraron valores de módulo de elasticidad entre 2543 y 3383 MPa. En relación con el esfuerzo de rotura, este se encontró entre 31,16 y 34,31 MPa con una deformación estuvo entre 1,97 y 2,60 %.

### 3.3.1.2 Resistencia a solicitaciones de compresión en Basas

Los tramos que se extraen entre los 4 y 8 metros de altura de la GAK se consideran basales o de altura media; respecto a las muestras anteriores se notó un incremento en el promedio de los valores máximos de resistencia, aunque se encontraron probetas con valores similares de resistencia a las cepas e incluso las sobrebasas.

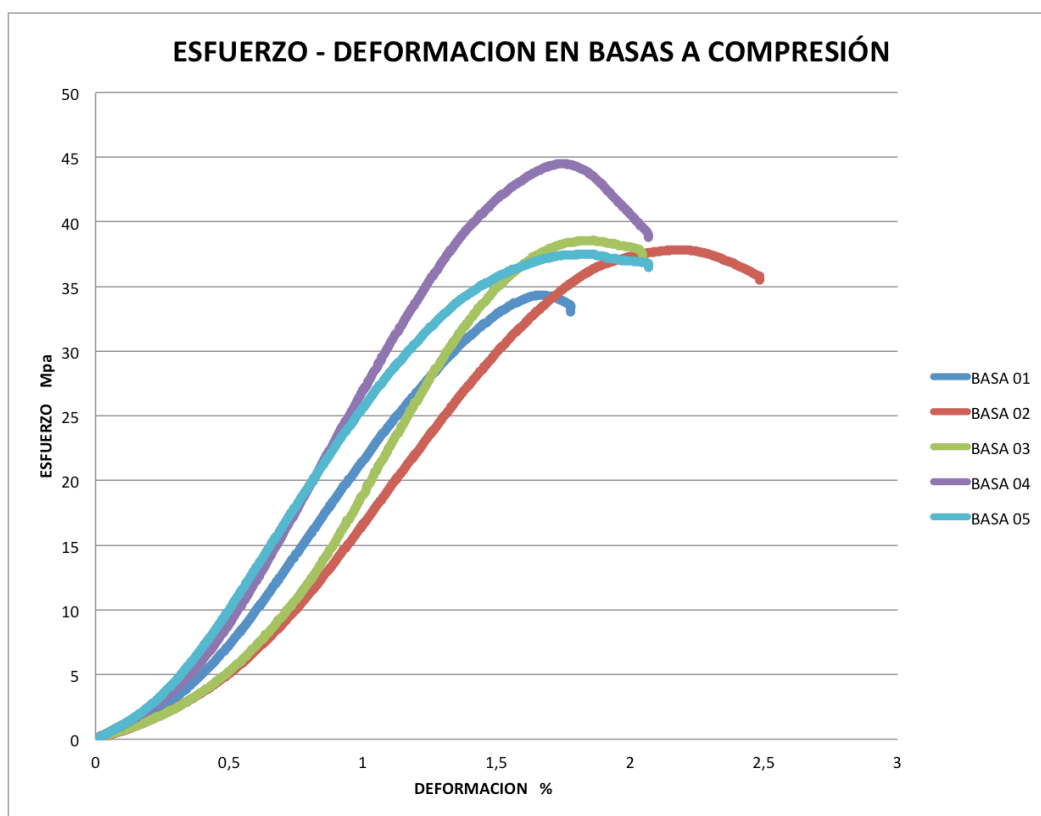


Figura 37. Curva esfuerzo-deformación en muestras de basas de GAK sometidas a compresión. Fuente: Autor.

Los valores máximos de resistencia estuvieron entre 33 MPa y 44,3 MPa; en relación con el módulo de elasticidad, este estuvo entre 2986 y 4563 MPa; por su parte, el esfuerzo a la rotura estuvo entre 33,07 MPa y 38,79 MPa con deformaciones entre 1,77 % y 2,48% (Figura 37).

### 3.3.1.3 Resistencia a solicitaciones de compresión en Sobrebasas

En relación con las secciones de mayor altura (hasta los 12 metros), se observó que los valores del esfuerzo máximo en promedio fueron más altos que en Cepas y Basas, sin embargo, se encontraron muestras cuyos valores máximos de resistencia estuvieron por debajo de algunas cepas, indicando mayores desviaciones estándar que en los caos anteriores.

En estas muestras los valores máximos de resistencia estuvieron entre 42,28 MPa y 46,30 Mpa y las deformaciones observadas estuvieron entre 1,87 % y 2,40 % (Figura 38).

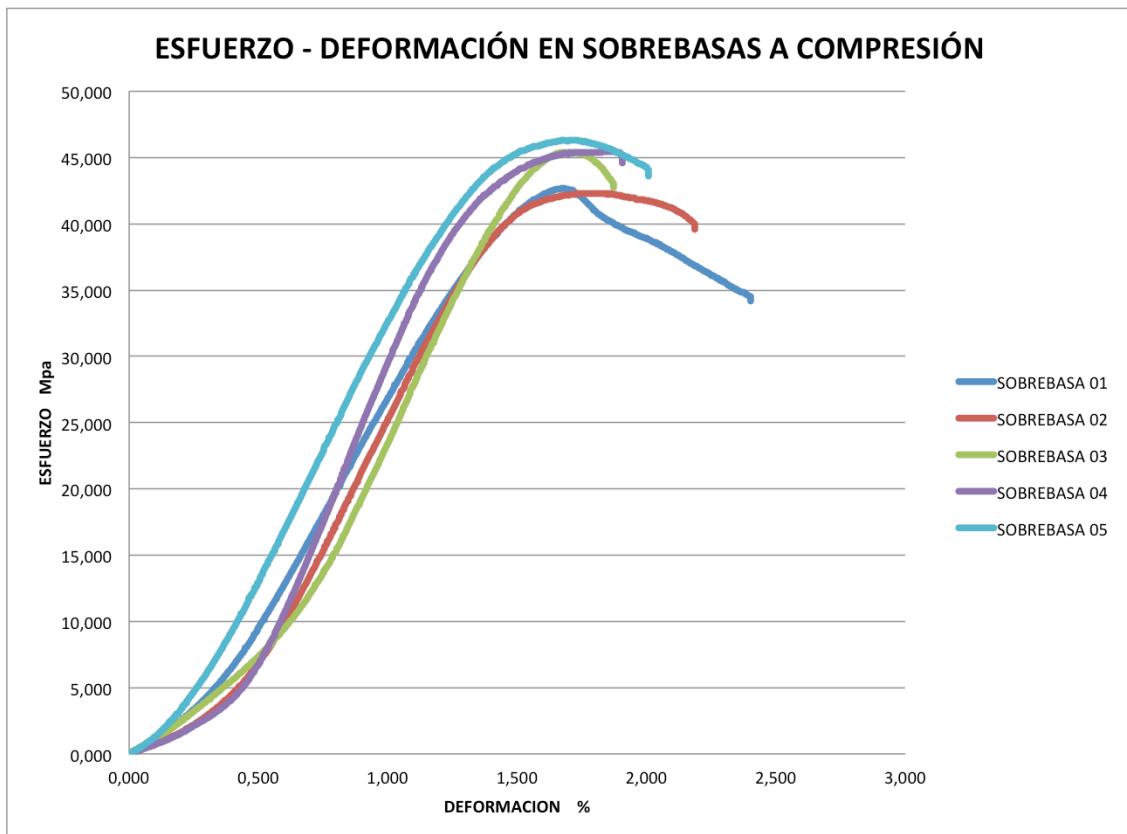


Figura 38. Curva esfuerzo-deformación en muestras de Sobrebasas de GAK sometidas a compresión. Fuente: Autor.

Por otra parte, en relación con el módulo de elasticidad y el esfuerzo de rotura, estos estuvieron entre 3807 MPa a 5181 MPa y 34,16 MPa y 44,59 MPa respectivamente.

Finalmente, al observar las deformaciones máximas obtenidas en todas probetas, se notó que estas tienden a aumentar en la medida en que disminuye de la altura de donde se obtuvo la probeta; sin embargo, es posible encontrar deformaciones muy altas y muy bajas en el mismo tipo de muestras, por lo que no se puede considerar la deformación lineal como un parámetro fiable de caracterización mecánica de la GAK. En resumen, las deformaciones para todas las probetas se ubicaron entre el 1,77% y 2,60%.

En la figura 39 se muestra el comportamiento a compresión de todas las muestras notándose que la rigidez y la resistencia máxima aumentan con la altura de la sección ensayada. El resumen de los resultados presentados anteriormente se muestra en la tabla 12.

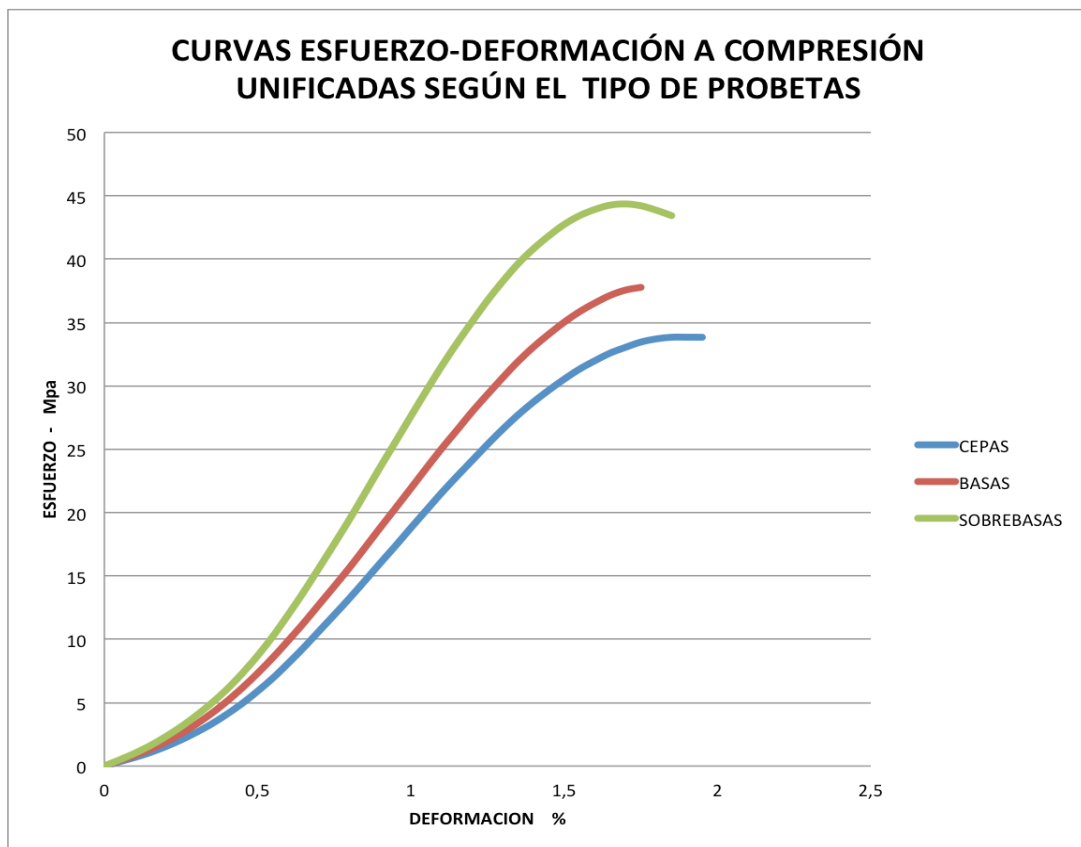


Figura 39. Curvas esfuerzo-deformación promedio según el tipo de muestras de GAK sometidas a compresión. Fuente: Autor.

En esta tabla es posible ver que los valores de esfuerzo máximo y de rotura, así como el módulo de elasticidad aumentan con la altura del culmo, al tiempo que la deformación disminuye, lo cual es lógico debido a que a mayor altura el material se hace más rígido.

|            | valores promedio       |                         |                              |                           |
|------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
|            | esfuerzo máximo<br>Mpa | deformación máxima<br>% | Modulo de Elasticidad<br>Mpa | esfuerzo de Rotura<br>Mpa |
| CEPAS      | 34,48                  | 2,24                    | 3093                         | 32,85                     |
| BASAS      | 38,54                  | 2,08                    | 3582                         | 36,25                     |
| SOBREBASAS | 44,42                  | 2,07                    | 4423                         | 40,14                     |

Tabla 12. Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación máxima, modulo de elasticidad y esfuerzo de rotura para muestras de GAK sometidas a compresión. Fuente: Autor.

### 3.3.2 COMPORTAMIENTO ANTE SOLICITACIONES DE FLEXIÓN

Al igual que en los ensayos anteriores, para determinar la tendencia de comportamiento mecánico de la GAK ante esfuerzos de Flexión, se separaron los valores de resistencia máxima según la altura del culmo de donde se extrajeron las probetas, encontrándose que los valores máximos de resistencia ante este tipo de esfuerzos fueron entre 55,56 MPa y 123,6 MPa.

Con respecto a los puntos de fractura, se observó que el material no presenta una fractura de tipo frágil, sino que éste va sufriendo pequeñas fracturas a nivel de sus capas internas, de manera similar al mecanismo de delaminación en un material compuesto laminado.

De acuerdo a lo anterior, las deformaciones máximas, obtenidas al momento de la fractura total del material, pudieron ser determinadas claramente solo en algunos casos. En la mayoría de las muestras ensayadas, la prueba se detuvo cuando la carga aplicada alcanzó un límite inferior del 10% de la carga máxima soportada por la muestra respectiva, sin que se produjera una fractura total de la sección ensayada.

### 3.3.2.1 Resistencia ante solicitaciones de Flexión en Cepas

El comportamiento mecánico de las muestras de cepas antes esfuerzos de flexión mostró valores más altos de resistencia máxima que los mismos tipos de muestra sometidos a compresión; en estos, los valores máximos de esfuerzos se ubicaron entre 55,56 MPa y 87,3 MPa.

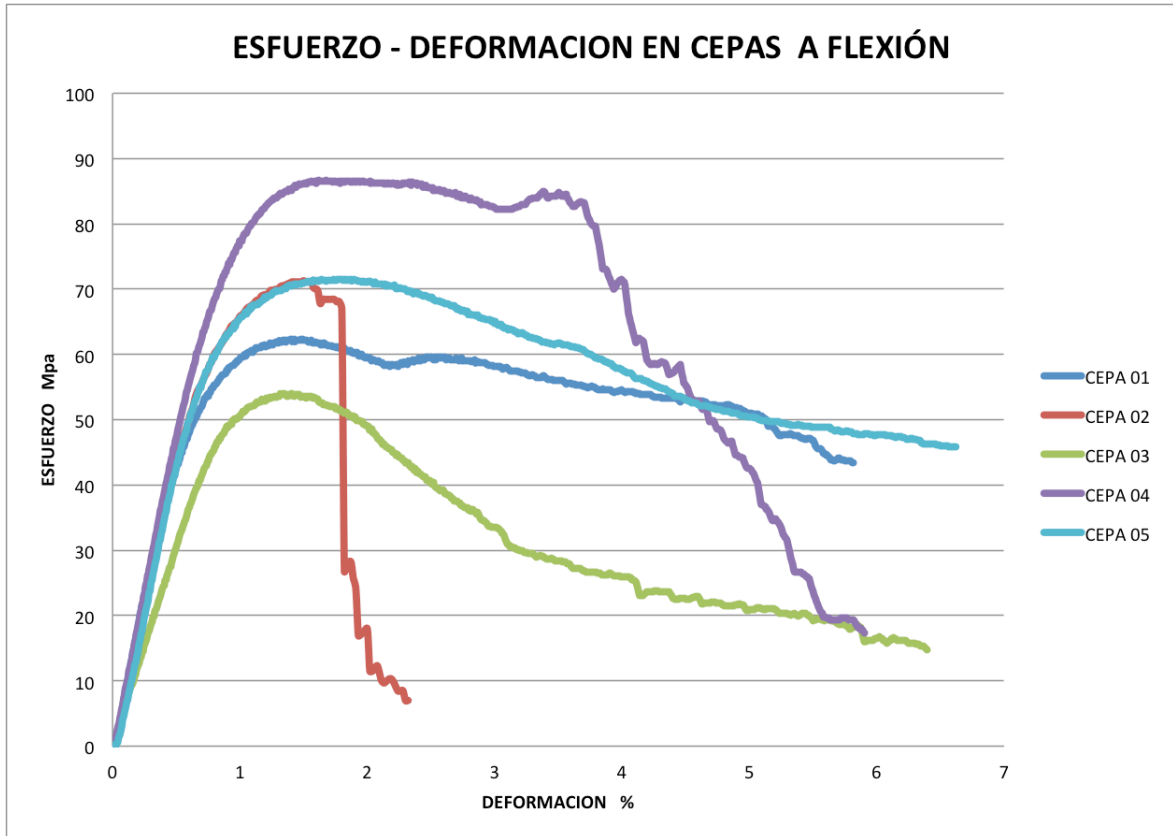


Figura 40. Comportamiento mecánico de muestras de cepas de GAK sometidas a flexión. Fuente: Autor.

Por otra parte, observando las curvas esfuerzo - deformación de la Figura 40, se notan dos comportamientos marcadamente diferenciados; el primero es el presentado en la zona elástica del material, el cual se muestra claramente lineal, con un límite proporcional cercano al esfuerzo máximo de cada probeta ensayada.

A diferencia de los ensayos de compresión, en éstos no existe zona de acomodamiento del material, por lo que la zona elástica se muestra proporcional a partir de cero esfuerzo y deformación.

A partir del esfuerzo máximo del material disminuyó la resistencia gradualmente con excepción de una probeta que mostró una falla más frágil; en esta probeta fue posible determinar con facilidad la deformación máxima y el esfuerzo a la rotura del material; sin embargo cuando la falla en el material ocurrió de manera gradual, no fué posible determinar con exactitud el valor de la deformación máxima y el esfuerzo a la rotura para esas muestras, dando como resultado deformaciones máximas que varían entre 2,32 % y 6,39 %.

### 3.2.2.2 Resistencia ante solicitaciones de flexión en Basas

En estas muestras de GAK (zona basal), los valores de la resistencia máxima se ubicaron entre 95,7 MPa y 105 Mpa y las deformaciones entre 5,82% y 8,89%. Analizando la curva esfuerzo-deformación, el comportamiento fué similar a las anteriores, es decir, no aparece en la gráfica un punto específico de ruptura del material (Figura 41).

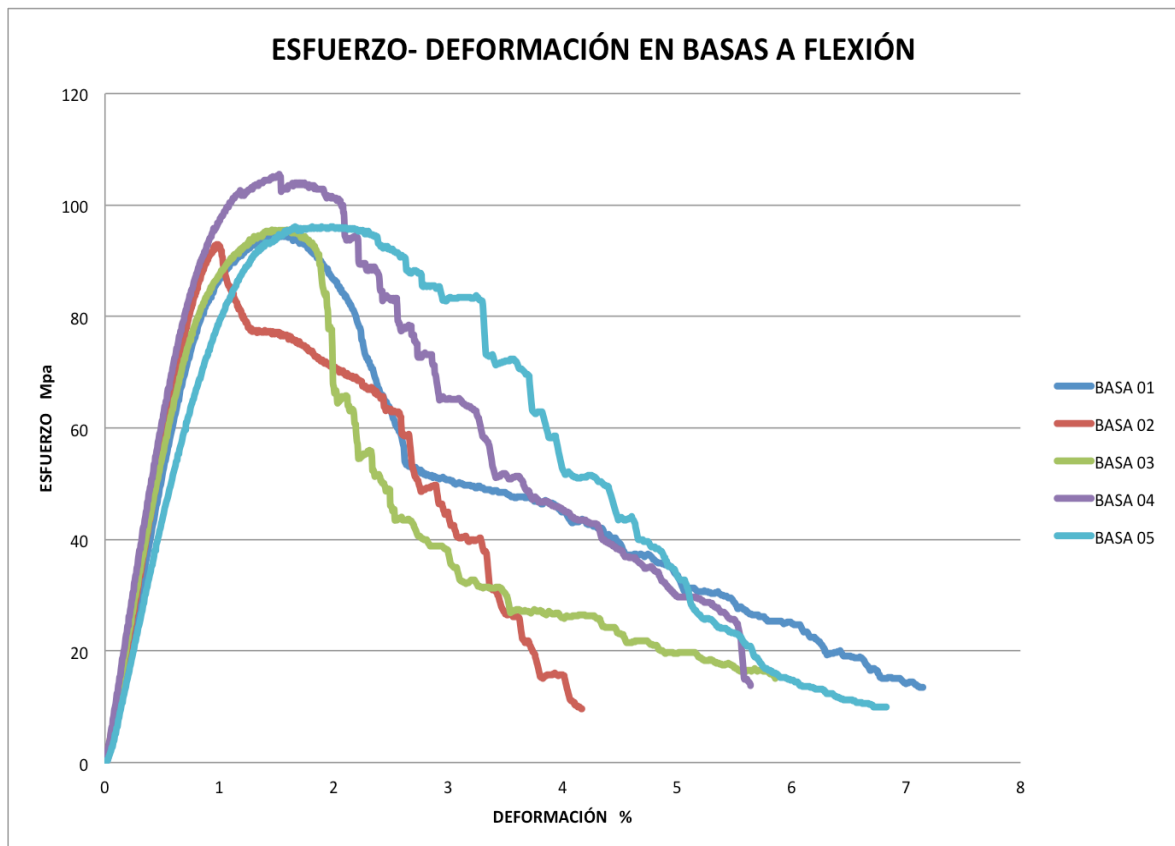


Figura 41. Comportamiento mecánico de muestras de Basas de GAK sometidas a flexión. Fuente: Autor.

Lo anterior sucede debido a la reacción del material ante la dirección del esfuerzo; el comportamiento de la GAK ante sollicitaciones de flexión se asemeja al de un material compuesto laminado, en donde cada una de las capas alcanza el punto de ruptura, sin embargo las que aun no han fallado logran un efecto de recuperación del material.

Pese a lo anterior, esta deformación se hace irreversible, con lo cual su aplicación como material estructural no es posible cuando se llega a estas deformaciones.

### 3.3.2.3 Resistencia ante sollicitaciones de Flexión en Sobrebases

Las muestras obtenidas de tramos hasta los 12 metros de altura aproximada (sobrebases) del culmo de GAK obtuvieron valores de esfuerzo máximo entre 80,78 MPa y 123,04 MPa; por otro lado, las deformaciones al momento de la falla del material se ubicaron entre 1,0% y 7,73% (Figura 42).

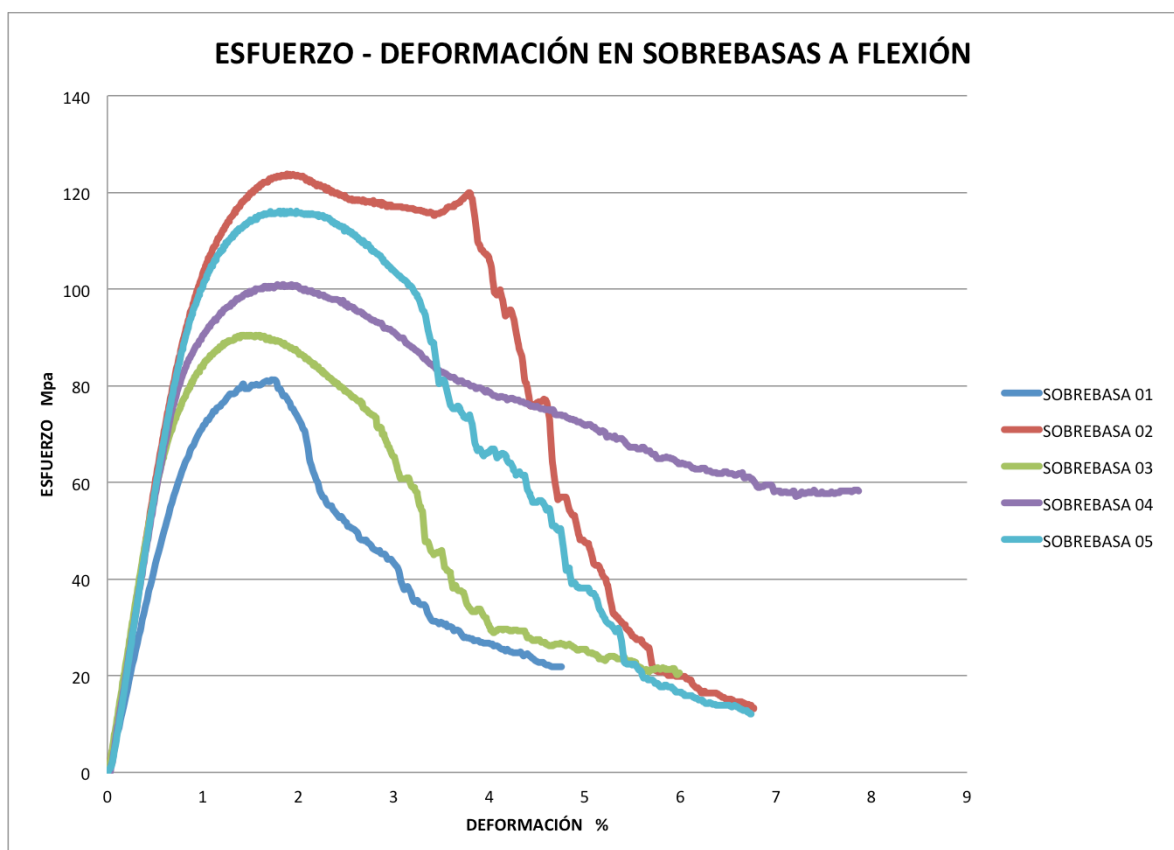


Figura 42. Comportamiento mecánico de muestras de Sobrebases de GAK sometidas a flexión. Fuente: Autor.

En la tabla 13 se muestra la manera como los valores de módulo de elasticidad y esfuerzo máximo aumentan a medida que los tramos ensayados son de mayor altura. Con respecto a los valores de esfuerzo y deformación correspondientes al instante de la fractura registrada, estos no muestran una relación con respecto a las alturas de los tramos utilizados.

|            | VALORES PROMEDIO       |                               |                              |
|------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|            | ESFUERZO MAXIMO<br>Mpa | DEFORMACION EN LA ROTURA<br>% | MODULO DE ELASTICIDAD<br>Mpa |
| CEPAS      | 64,97                  | 4,55                          | 8989,2                       |
| BASAS      | 95,82                  | 5,92                          | 10918,2                      |
| SOBREBASAS | 102,28                 | 6,63                          | 11475,8                      |

Tabla 13. Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación al momento de la rotura y módulo de elasticidad para muestras de GAK sometidas a ensayo de flexión  
Fuente: Autor.

Por otra parte, en la figura 43, se puede observar la manera como los valores de esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad aumentan con la altura, aunque este aumento no se diferencia tanto entre las basas y sobrebasas, como si lo hace entre éstas y las cepas.

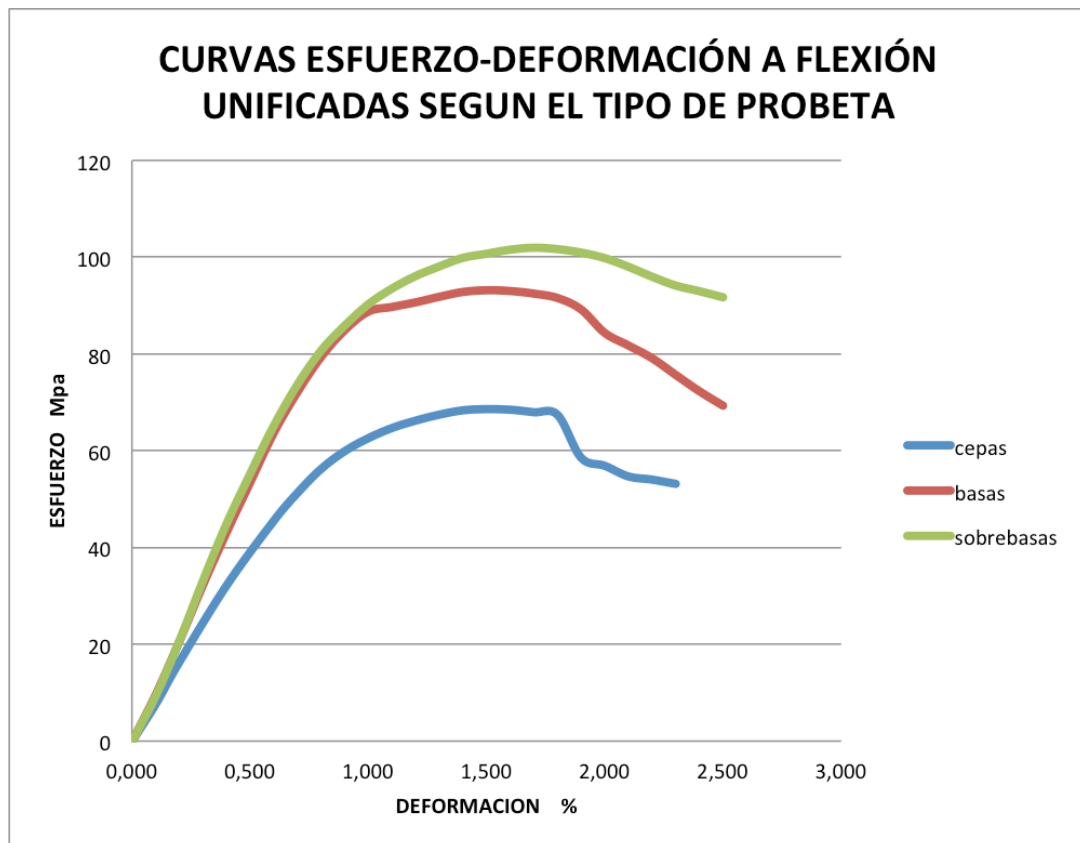


Figura 43. Curvas esfuerzo-deformación promedio según el tipo de muestras de GAK sometidas a Flexión. Fuente: Autor.

### 3.3.3. COMPORTAMIENTO ANTE SOLICITACIONES DE TRACCIÓN PARALELA A LA FIBRA

Las muestras de GAK solicitadas a tracción paralela a la fibra mostraron resistencias máximas entre 82 MPa y 198,3 MPa y módulos de elasticidad de entre 4543 MPa y 12888 Mpa; a diferencia de los resultados encontrados en los ensayos anteriores, los valores de estas pruebas presentan gran variabilidad entre valores máximos y mínimos entre esfuerzos, resistencias y porcentajes de deformación máxima.

La razón para tal variabilidad se puede deber a varios factores, desde la microestructura misma de la sección, hasta su geometría.

Una diferencia notable en estos ensayos en comparación con los de flexión es el tipo de falla; mientras que en los anteriores la falla se da de manera progresiva, es decir dúctil, en los de tracción la falla es de tipo frágil, con lo cual los esfuerzo máximos son virtualmente los mismos de rotura del material.

Por otra parte, el comportamiento mecánico de la GAK en los ensayos de tracción está relacionado directamente con la cantidad de fibras presentes en la porción de ensayo; debido a que en la elaboración de la misma, se pierde parte de su sección transversal; es posible que la cantidad de haces vasculares presentes en la sección de ensayo de la probeta o “gage length” no sea proporcional a la cantidad total de los mismos en la sección total correspondiente.

En consecuencia, las secciones ensayadas pueden no reflejar con total precisión las propiedades mecánicas de la sección ensayada.

#### 3.3.3.1 *Resistencia a Tracción paralela a la fibra en Cepas*

En las primeras secciones, se observaron valores de resistencia máxima entre 120,71 MPa y 173,6 MPa para un promedio de 138,32 Mpa; el módulo de elasticidad por su parte se ubicó entre 4543 MPa y 12888 Mpa para un promedio de 8027,8 MPa, estos valores fueron similares aunque ligeramente menores a los obtenidos en los ensayos de flexión.

En relación con las deformaciones al momento de la rotura, sus valores estuvieron entre 2,61% y 8,44% con un promedio de 4,89 %, este porcentaje se asemeja también al encontrado en las probetas ensayadas a flexión (Figura44).

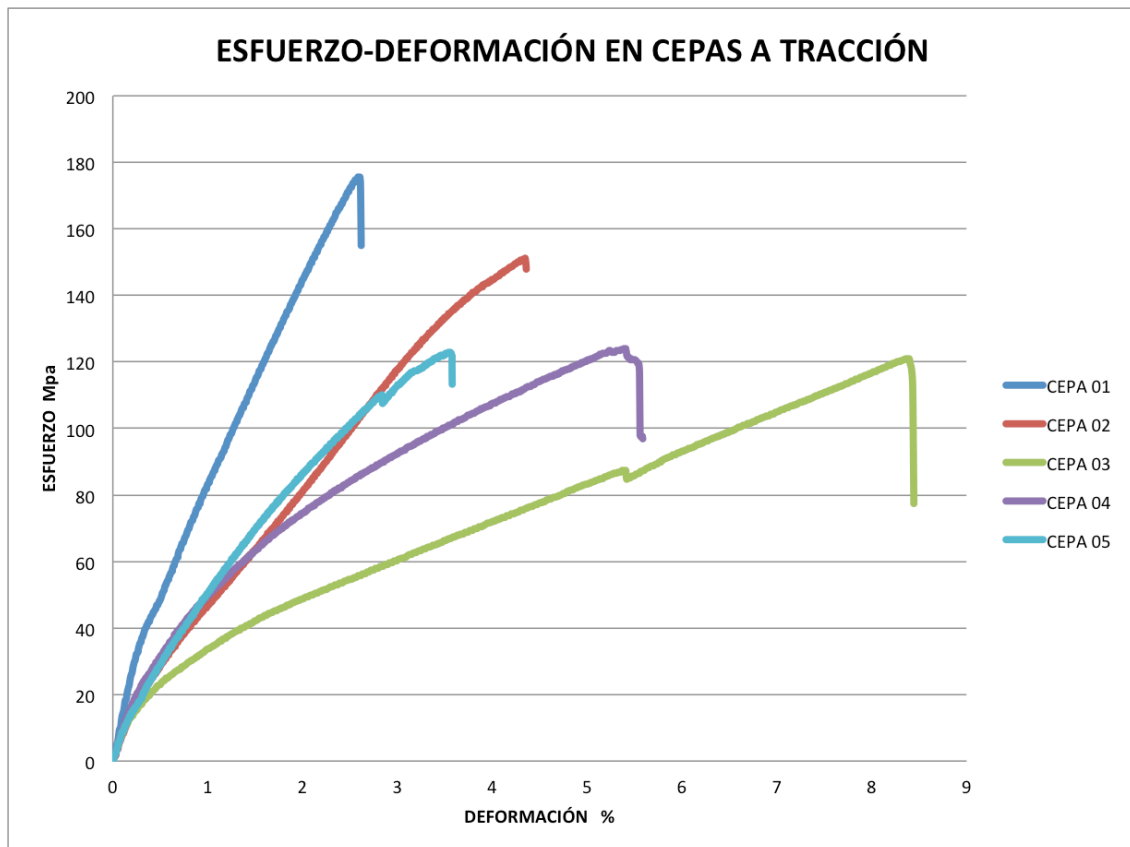


Figura 44. Comportamiento mecánico de muestras de Cepas de GAK sometidas a tracción. Fuente: Autor.

En la gráfica se observa un comportamiento similar en todas las muestras, en donde en una primera parte cercana al 10% de la deformación total, el material muestra un comportamiento de alta rigidez; luego de lo cual se presenta una caída brusca de la resistencia, hasta que se presenta la ruptura del material.

Las fallas son en un principio imperceptibles visualmente, pero reflejan el rompimiento de algunas de las fibras, no obstante, el material continua resistiendo mayores cargas hasta el valor máximo.

Adicionalmente a lo anterior, ocasionalmente estas fallas parciales llegan a ser importantes y visibles, sin embargo el material recupera la resistencia pasando por encima de los valores de esfuerzo en donde estas fallas iniciales se

produjeron. En estas zonas, se considera que material que ha fallado, luego no se incluyen en los resultados ni en las graficas.

### 3.3.3.2 Resistencia a Tracción paralela a la fibras en Basas

En las muestras de la zona basal, los esfuerzos máximos se ubicaron entre 82,0 MPa y 198,3 MPa con un promedio de 138,24 MPa; aunque entre los valores máximo y mínimo hubo mayor diferencia que en las muestras anteriores, indicando una mayor desviación estándar, el promedio fue prácticamente el mismo.

En los módulos de elasticidad, el valor promedio fué de 8049 MPa, ligeramente mayor que el MOE en las cepas, lo mismo que su deformación, que llegó al 5,34% (Figura 45).

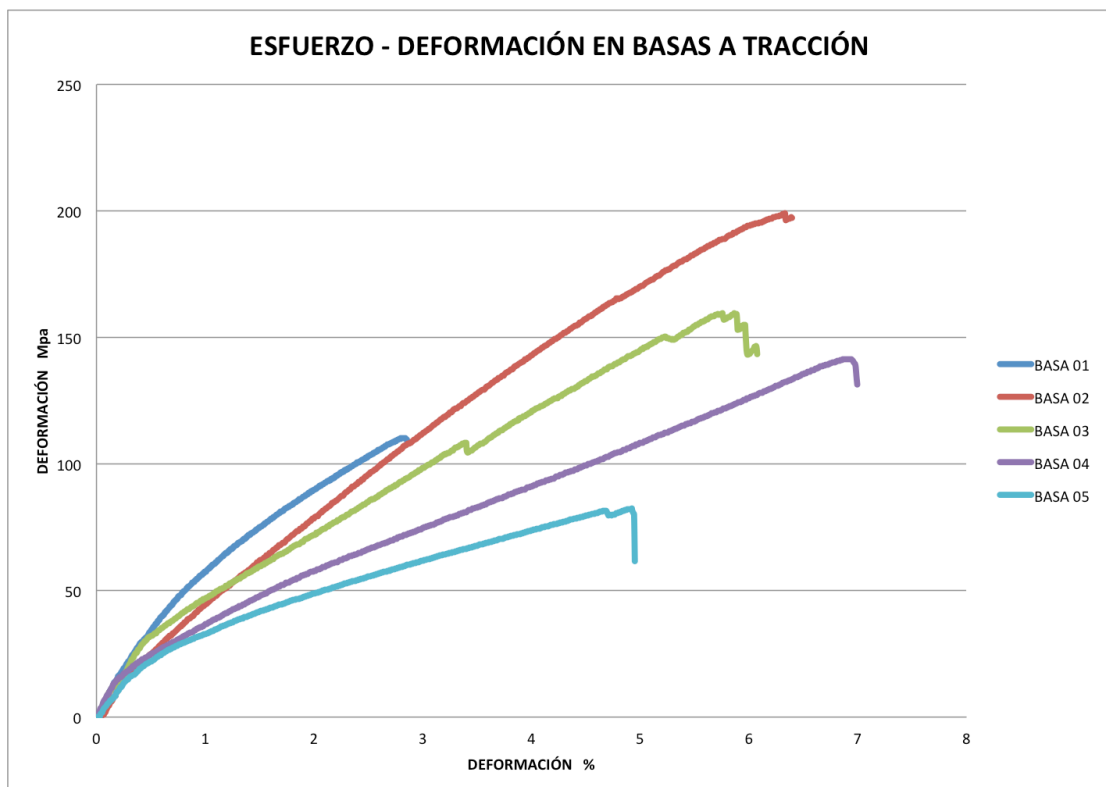


Figura 45. Comportamiento mecánico de muestras de Basas de GAK sometidas a Tracción. Fuente: Autor.

Respecto a las deformaciones al momento de la rotura, se observó el mismo comportamiento de las muestras anteriores, en términos generales las muestras se deforman cerca del 5% de la longitud inicial; sin embargo, hay probetas que muestran una mayor rigidez, con deformaciones del 3% aproximadamente, y otras una mayor ductilidad, con el 7%.

### 3.3.3.3 Resistencia a Tracción paralela a la fibra en Sobrebasas

En las sobrebasas, se encontraron valores de esfuerzos máximos entre 99,8 MPa y 185,5 MPa con un promedio de 142,94 MPa, valor un poco mas alto que los anteriores, este comportamiento es coherente con lo esperado para este tipo de muestras de GAK.

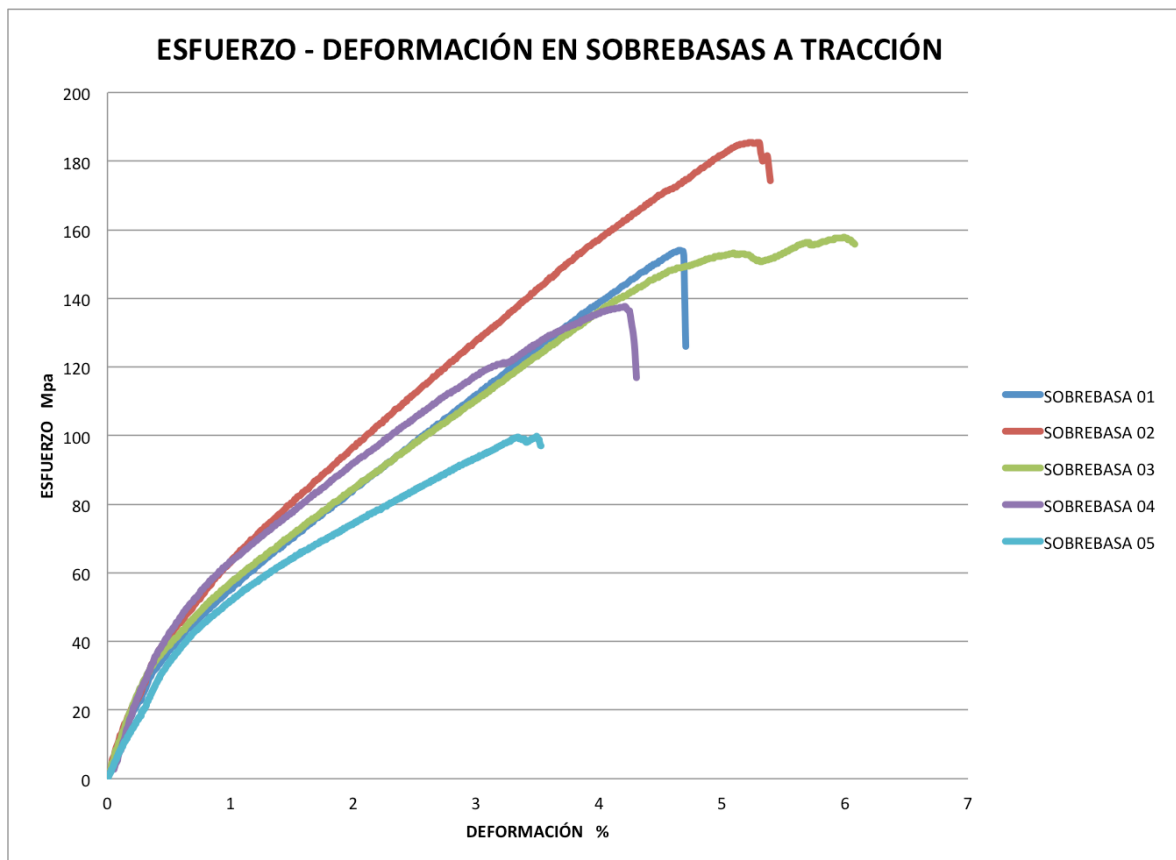


Figura 46. Comportamiento mecánico de muestras de Sobrebasas de GAK sometidas a Tracción. Fuente: Autor.

En relación con los módulos de elasticidad, estos se ubicaron entre 8994 MPa y 10492 MPa con un promedio de 9794 MPa, este resultado muestra un aumento

en la rigidez del material en la zonas altas, guardando coherencia con los resultados de las muestras y ensayos anteriores (Figura 46).

En la Tabla 14 se muestra un resumen de los valores encontrados en los ensayos de tracción; se observa que los esfuerzos máximos soportados por el material estuvieron en el rango de 138 MPa a 143 MPa aproximadamente en promedio, aunque pueden existir muestras que estén por encima o debajo de estos valores.

Por otra parte los valores de módulos de elasticidad se ubicaron entre 8000 MPa y 9700 MPa, estos valores son similares a los encontrados en los ensayos de flexión y éstos dos, muy superiores a los obtenidos en los ensayos de compresión, en donde oscilaron entre 3000 MPa y 4500 MPa; como se mencionó anteriormente, no se incluyen los resultados de esfuerzo en la rotura ya que se consideran los mismos de esfuerzo máximo.

|            | VALORES PROMEDIO       |                               |                              |
|------------|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|            | ESFUERZO MAXIMO<br>Mpa | DEFORMACION EN LA ROTURA<br>% | MODULO DE ELASTICIDAD<br>Mpa |
| CEPAS      | 138,32                 | 4,89                          | 8027,8                       |
| BASAS      | 138,24                 | 5,34                          | 8049                         |
| SOBREBASAS | 142,94                 | 4,74                          | 9794,4                       |

Tabla 14. Valores totales promedio de esfuerzo máximo, deformación al momento de la rotura y modulo de elasticidad para muestras de GAK sometidas a ensayos de tracción  
Fuente: Autor.

## 4. DISCUSION DE RESULTADOS

### 4.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS

La presencia de haces vasculares varía según las alturas del culmo donde se obtuvieron las muestras; en resumen se observó que la densidad aparente de fibras tuvo un incremento de 0,36 a 0,42 en promedio entre las cepas y las sobrebasas, y que este incremento está relacionado con el espesor de la sección que contiene dichos haces vasculares y a la relación entre dicho espesor y el diámetro o radio exterior de la misma (Tabla 15).

|            | Diámetro Exterior<br>cm | Espesor<br>mm | relación<br>R ext./Espesor | Densidad<br>Aparente<br>de Fibras |
|------------|-------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------------|
| CEPAS      | 11,84                   | 15,6          | 3,83                       | 0,36                              |
| BASAS      | 11,14                   | 11,55         | 4,89                       | 0,41                              |
| SOBREBASAS | 11,04                   | 10,75         | 5,7                        | 0,42                              |

Tabla 15. Valores promedio de Diámetro exterior, espesor, relación Diámetro exterior/espesor y densidad aparente de Fibras para muestras de Cepas, Basas y Sobrebasas de GAK. Fuente: Autor.

Por otra parte, los valores de la relación Radio exterior/espesor aumentan con la altura de la sección estudiada, al igual que lo hace la densidad aparente; de tal manera que, mediante este parámetro dimensional es posible predecir la altura aproximada de la sección que se esté estudiando (Cepa, Basa, Sobrebasa).

Lo anterior resulta de gran importancia en el actual estudio, ya que como se ha encontrado hasta el momento, el comportamiento de la densidad aparente de fibras no es directamente proporcional a la altura del culmo, sino que asume un comportamiento con tendencia lineal a ésta, aunque diferente para cada sección.

Además, la presencia de haces vasculares varía significativamente entre las paredes interior y exterior de la sección transversal de la GAK, así como en todas las plantas de morfología similar.

En la figura 47 se observa la variación de la densidad aparente de fibras sobre una línea radial para tres muestras de GAK, separadas por altura (cepa, basa y sobrebasa); la gráfica tiene oscilaciones que representan los espacios ocupados por fibras y vacíos de las mismas.

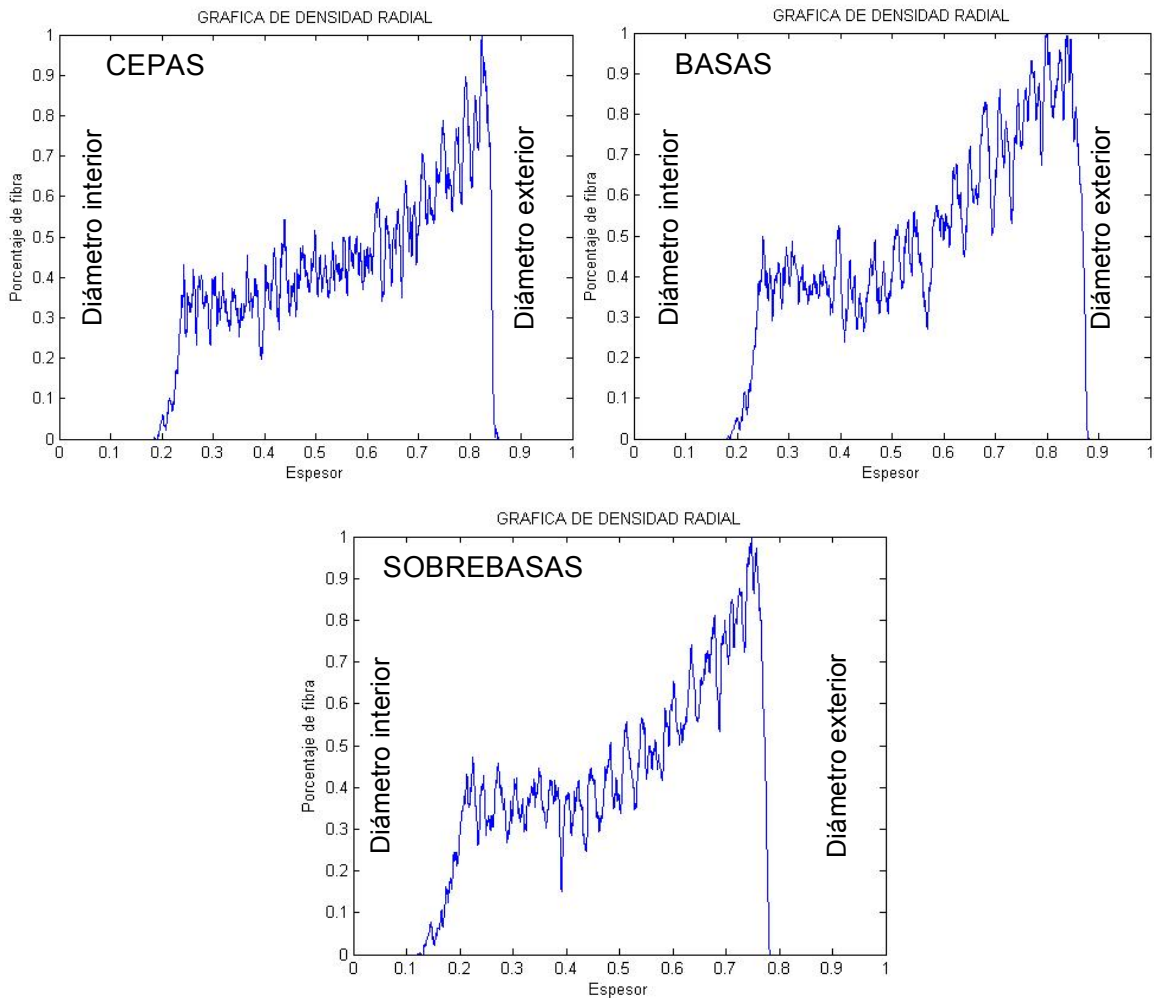


Figura 47. Esquemas de variación radial de la densidad aparente de fibras en tres diferentes alturas de GAK. Fuente: Autor.

En las curvas mostradas se puede observar que la presencia de fibras aumenta desde el diámetro interior hasta el exterior; en el eje del espesor (horizontal) se observa que luego de un espacio que permanece vacío debido a que esta ocupado por la corteza, las fibras empiezan a tener mayor presencia, desde 0,1 hasta 0,9 de densidad aparente.

Para las tres muestras seleccionadas, el comportamiento fué muy similar, ya que el valor del espesor mostrado, varió proporcionalmente para las tres (cepa, basa y sobrebasa) entre cero y uno. De esta manera se puede observar que el mecanismo de la variación es el mismo en los tres casos, sin embargo, los valores máximo y mínimo de densidad aparente de fibras tienen algunas variaciones:

Por ejemplo, en las cepas la densidad de fibras empieza con valores en promedio de 0,3 y se hacen mayores en las basas y sobrebases en donde son en promedio de 0,4. Por otro lado, en las Sobrebases el espacio ocupado por la corteza exterior es ligeramente mayor que en las muestras de menor altura. Estas particularidades hacen que en la preparación de las muestras, para realizar ensayos de flexión, pero sobretodo de tracción, la densidad aparente de fibras de dichas áreas de sección transversal sea potencialmente distinta de la original de la sección estudiada.

En el caso de las muestras para ensayos de flexión la cantidad de material que se pierde es muy poco (10% o menor), de tal manera que la densidad aparente de fibras obtenida en este estudio se puede considerar como válida; para el caso de las muestras para ensayos de tracción, la cantidad de material que se desbasta de la sección transversal original es cerca del 60% o mayor, esto puede ocasionar variaciones importantes en los resultados de los ensayos. Para este caso sería importante determinar la densidad misma de la sección a ensayarse, lo cual es imposible ya que la muestra se destruiría en la extracción de la sección de estudio para microscopía; otra opción sería usar una sección de similar geometría y ubicación en la sección, o bien replantear el protocolo para la elaboración del ensayo, de tal manera que use una sección radial en vez de una transversal, aunque esto supone dificultades para la sujeción de la probeta al equipo de ensayos (Figura 48).

De otra parte, estas variaciones deben mirarse desde el punto de vista de la aplicación del material; como se resumió en la Tabla 15, estas oscilaciones de densidad para las cepas ocurren sobre una línea radial de promedio 15,6 mm, mientras que en las basas y sobrebases, dicha variación se da entre 10,75 y

11,55 mm en promedio respectivamente. Por esta razón, para efectos de la aplicación del material en la elaboración de materiales laminados, en donde parte del material se pierde en el ajuste perpendicular de las caras, es muy importante usar la mayor cantidad de material posible, o dicho de otra manera, en términos de eficiencia hay que tratar de minimizar el material que se pierde en el proceso, por lo que lo recomendable sería utilizar los tramos separados por altura o que presenten la mayor estabilidad dimensional posible.

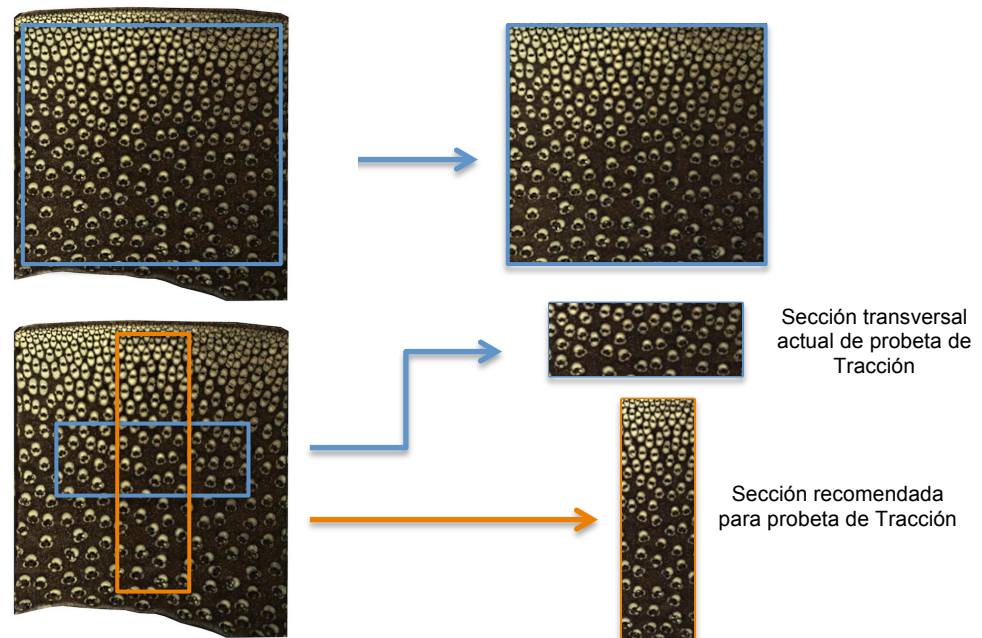


Figura 48. Esquemas de preparación de las caras radiales de las probetas para ensayos mecánicos de GAK. Fuente: Autor.

## 4.2 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS

De acuerdo a los resultados encontrados en el presente estudio, las propiedades mecánicas de la GAK varían, por una parte, con la altura del culmo, y por otra, con la dirección de aplicación de la carga.

En términos generales, a mayor altura de culmo mayores son los valores de las propiedades mecánicas independientemente del tipo de carga; sin embargo se notó una gran diferencia entre las propiedades a compresión, que resultaron notablemente menores, a aquellas de flexión y tracción (Tabla 16).

| ALTURA DE CULMO | TIPO DE ESFUERZO |         |          |              |
|-----------------|------------------|---------|----------|--------------|
|                 | COMPRESION       | FLEXION | TRACCION |              |
| CEPAS           | 3093             | 8989    | 8028     | MOE          |
|                 | 34,5             | 65      | 138,3    | $\sigma$ MAX |
| BASAS           | 3582             | 10918   | 8049     | MOE          |
|                 | 38,5             | 95,8    | 138,3    | $\sigma$ MAX |
| SOBREBASAS      | 4423             | 11476   | 9794     | MOE          |
|                 | 44,4             | 102,3   | 143      | $\sigma$ MAX |
| valores en MPa  |                  |         |          |              |

Tabla 16. Valores promedio de Módulo de elasticidad y esfuerzo máximo ante esfuerzos de compresión, flexión y tracción y a tres alturas de culmo de GAK. Fuente: Autor.

Los valores encontrados ante sollicitaciones de compresión paralela a la fibra estuvieron acordes con los resultados de estudios previos realizados por González et al. (2008) para quienes los valores de esfuerzo máximo se ubicaron en promedio entre 27,8 y 35,6 MPa, muy similares a los resultados del presente estudio [10].

Por otra parte, González (2007) encontró valores promedio de  $56,2 \pm 10,1$  Mpa, un poco más altos que los registrados en esta investigación, aunque con variaciones estándar más altas entre los resultados, que pudo deberse al protocolo mismo del ensayo y al número de muestras ensayadas, al lugar de procedencia de los culmos y a muchos otros factores [11].

Del mismo modo, Osorio et al. (2005) ensayó muestras de GAK a compresión encontrando esfuerzos al límite proporcional cercanos a los 30 MPa concordando con los resultados de esta investigación [12].

En los trabajos anteriores se analizaron variables como la edad de las muestras y el contenido de humedad aparte de las variables físicas dimensionales como son el diámetro exterior y el espesor; en ellos se coincide en concluir que las variables dimensionales que mejor se pueden relacionar con las propiedades mecánicas son el diámetro exterior y el espesor de la sección transversal.

Con la anterior comparación de resultados se puede concluir que los valores aquí obtenidos se encuentran dentro de los valores esperados y el comportamiento

mecánico del material no se vió afectado por la manipulación durante su transporte.

Analizando el módulo de elasticidad, los valores más altos se encontraron en las sobrebasas sometidas a flexión (11476 MPa), y los más bajos se encontraron en las cepas sometidas a compresión paralela a la fibra (3093 MPa). Al respecto, algunas investigaciones muestran diferencias en sus resultados; para González et al. (2008) el MOE se ubicó entre 603 y 1947 MPa, mientras que para González (2007), el mismo fué en promedio de 17859 Mpa; lo anterior puede deberse al tipo de ensayo realizado para su determinación, al protocolo mismo de su realización y a muchos otros factores como el lugar de procedencia de las muestras[10] [11].

Sin embargo existe coherencia con todos los estudios consultados en los valores del módulo de elasticidad así como el esfuerzo máximo; que fueron mayores en los ensayos de flexión que en los de tracción y compresión paralela a la fibra.

#### 4.3 RELACION DE LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS RESPECTO A LAS PROPIEDADES MECANICAS

Como el objetivo principal de este proyecto de investigación es proponer una metodología para la determinación de las propiedades mecánicas de la GAK basada en la medición de la densidad aparente de fibras, se presentan correlaciones mediante regresión lineal simple, entre los esfuerzos de compresión, flexión y tracción longitudinal, los módulos de elasticidad y las densidades aparentes.

##### 4.3.1 PROPIEDADES MECÁNICAS A COMPRESIÓN PARALELO A LA FIBRA VS. DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS

Basados en los resultados de los ensayos mecánicos y de microscopía, se establecieron relaciones lineales entre las variables físicas y las propiedades mecánicas principales (módulo de elasticidad y esfuerzo máximo); en ellas se notó que el comportamiento mecánico de la GAK está altamente relacionado con la altura del culmo que se analiza (Figuras 49 y 50).

De acuerdo a los resultados, es posible encontrar diferentes valores de densidad aparente de fibras con desviaciones estándar relativamente altas para la totalidad de las muestras estudiadas; sin embargo, ellas guardan una estrecha relación con las propiedades mecánicas de cada altura de sección, si se analizan por separado.

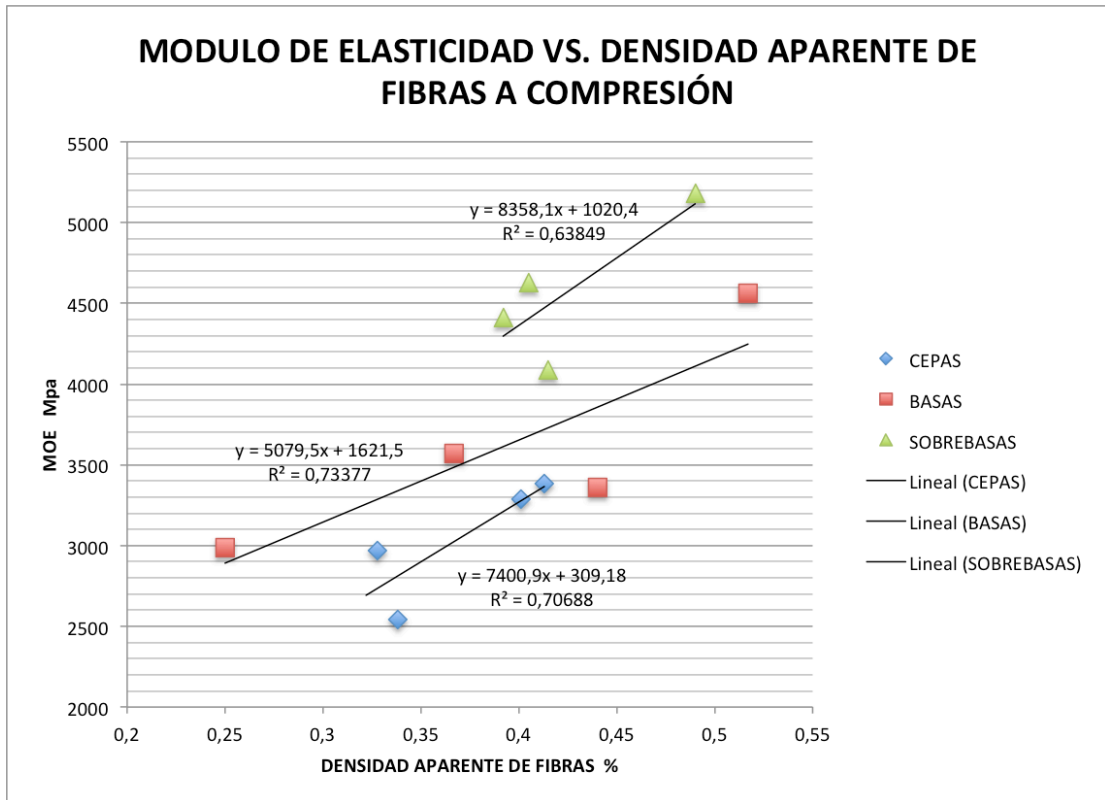


Figura 49. Módulo de elasticidad a compresión vs. Densidad aparente de fibras de GAK. Fuente: Autor.

Tanto para el módulo de elasticidad como para el esfuerzo máximo a compresión, sus valores respectivos aumentaron con el aumento de la altura de sección transversal. El módulo de elasticidad (MOE) a compresión de las muestras se relacionó con la densidad aparente de fibras separadas por la altura del culmo, mostrándose que dicha relación entre variables no es lineal a lo largo de todo el tallo (figura 49).

De la misma manera, en la Figura 50 se determinaron sendas relaciones, esta vez con respecto al esfuerzo máximo a compresión paralelo a la fibra; en ellas el

comportamiento observado fue similar al del MOE, es decir, con el aumento de la altura del culmo analizado y la disminución que esto supone del espesor de sección, aumenta el módulo de elasticidad. Las relaciones propuestas como modelo para su determinación posterior, se establecieron separadas por las alturas de sección (Cepas, Basas y sobrebasas), siendo el comportamiento entre densidad aparente y esfuerzo máximo directamente proporcional.

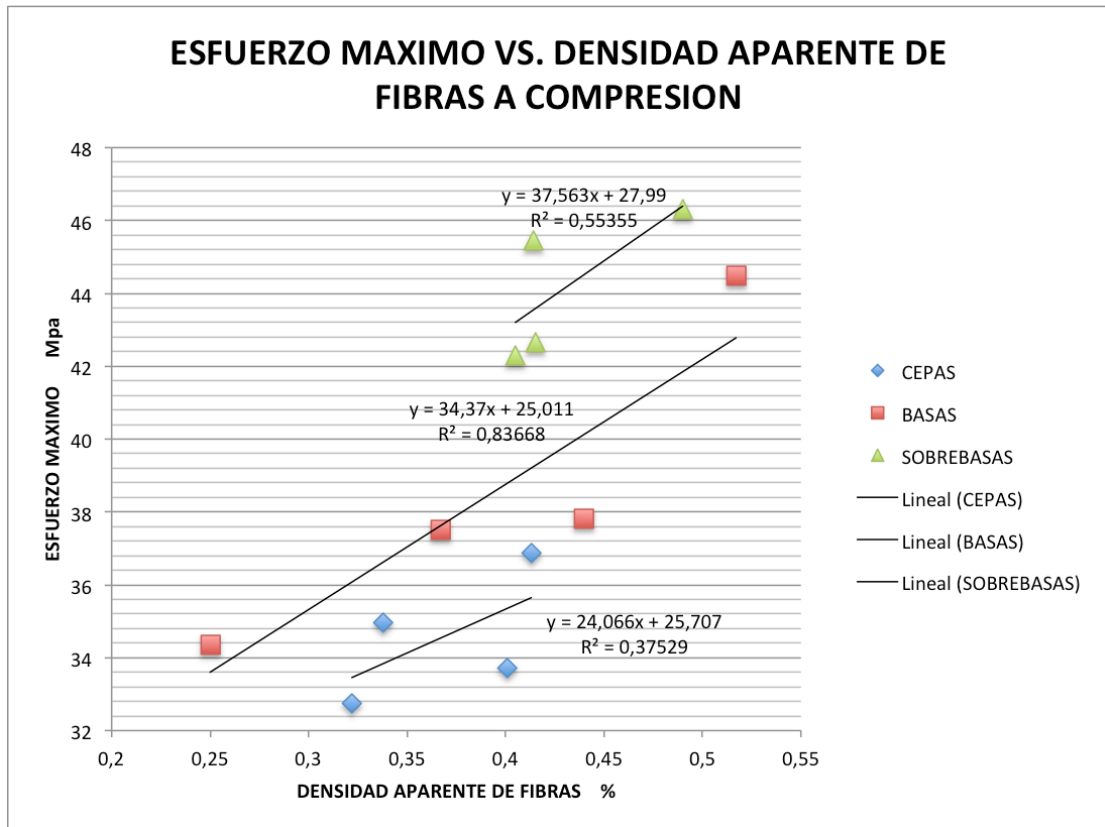


Figura 50. Esfuerzo máximo a compresión vs. Densidad aparente de fibras de GAK. Fuente: Autor.

En resumen, se pueden plantear las siguientes relaciones lineales:

Para CEPAS:  $\epsilon = 7401\rho + 309$  (1)

$\sigma_{max} = 24,1\rho + 26$  (2)

para BASAS:  $\epsilon = 5080\rho + 1622$  (3)

$\sigma_{max} = 34,4\rho + 25$  (4)

para SOBREBASAS:  $\epsilon = 8538\rho + 1020$  (5)

$$\sigma_{max} = 37,6\rho + 28 \quad (6)$$

En donde  $\epsilon$  es el módulo de elasticidad,  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo a compresión paralelo a la fibra y  $\rho$  es la densidad aparente de fibras.

#### 4.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS A FLEXIÓN VS. DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS

El comportamiento mecánico de la GAK a flexión mostró algunas variaciones con respecto al mostrado ante compresión, lo cual demuestra su naturaleza ortotrópica.

En primer lugar, el módulo de elasticidad ante este tipo de esfuerzos mostró valores mas altos para las Cepas, que para las Basas y Sobrebasas; al mismo tiempo, éstas últimas mostraron un comportamiento muy similar, lo cual muestra que la rigidez de las Basas y Sobrebasas es prácticamente equivalente y además se puede considerar directamente proporcional a la densidad aparente de fibras (Figuras 51 y 52).

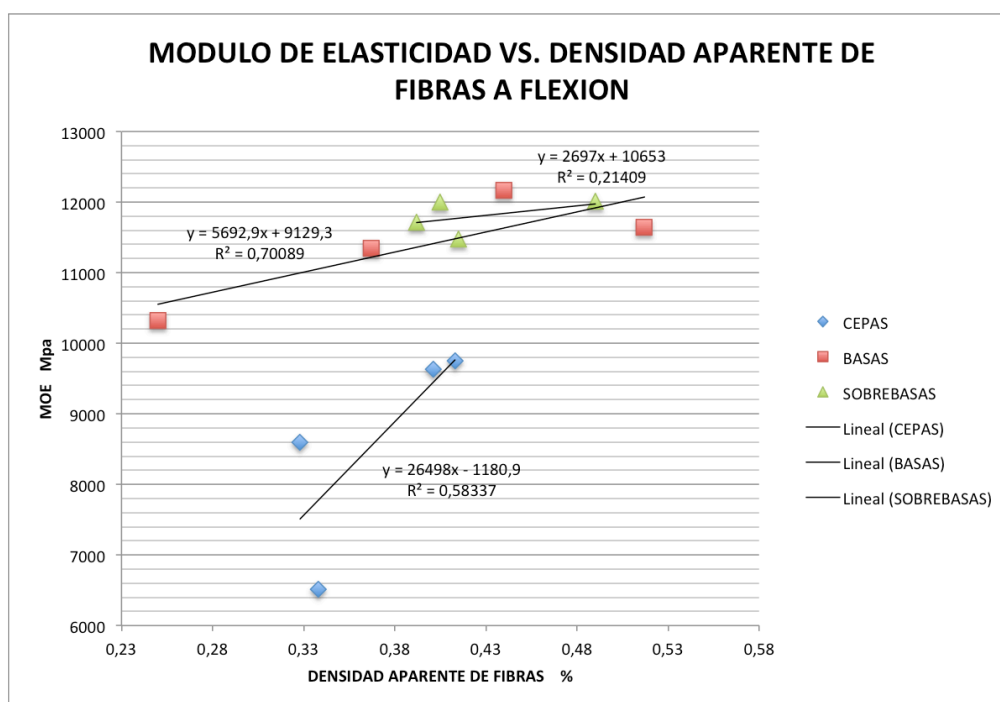


Figura 51. Módulo de elasticidad a flexión vs. Densidad aparente de fibras de GAK.

Fuente: Autor.

La relación entre el módulo a flexión y la densidad aparente de fibras se presenta en las ecuaciones 7 y 8:

Para CEPAS:  $\epsilon = 7401\rho + 309$  (7)

para BASAS Y SOBREBASAS  $\epsilon = 5080\rho + 1622$  (8)

En donde  $\epsilon$  es el módulo de elasticidad y  $\rho$  es la densidad aparente de fibras.

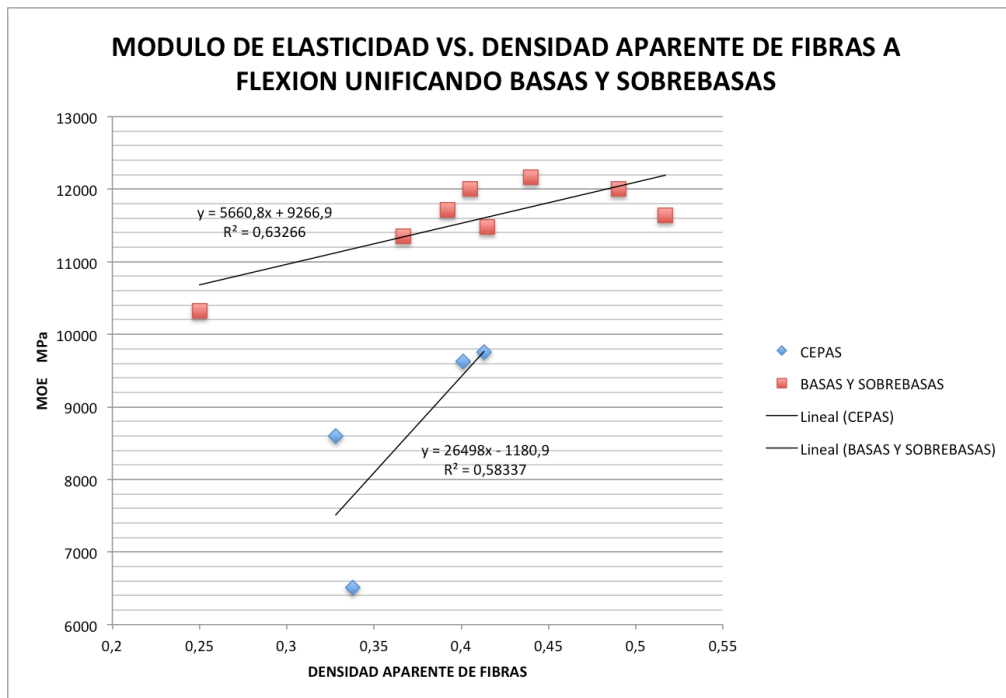


Figura 52. Módulo de elasticidad a flexión vs. Densidad aparente de fibras unificando Basas y Sobrebasas de GAK. Fuente: Autor.

Por otra parte, la densidad aparente de fibras y los esfuerzos máximos a flexión, presentan una relación directamente proporcional en cepas y Sobrebasas, y con menor coeficiente de correlación en las Basas (Figura 53); esto se debe a que en las Basas hubo mayor coeficiente de variabilidad entre las variables de estudio, ya que como se puede observar en la tabla 9, se encontraron densidades aparentes de fibras con mayores desviaciones estándar que en los otros tipos de muestra.

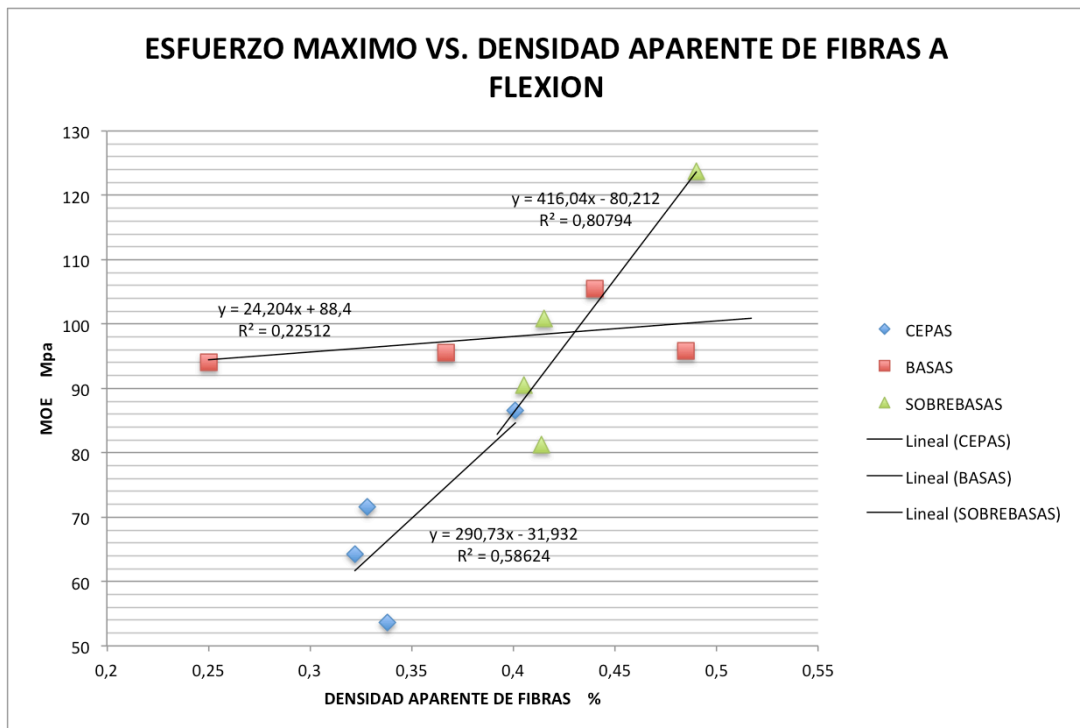


Figura 53. Esfuerzo máximo a flexión vs. Densidad aparente de fibras de GAK.  
Fuente: Autor.

Como consecuencia de lo anterior, el coeficiente de correlación es de 0.46, lo que demuestra que puede existir una relación entre la variable dependiente (esfuerzo máximo a flexión) y la densidad aparente de fibras; por tanto es necesario ampliar el estudio a un mayor número de población de muestras con el fin de perfeccionar el modelo.

En resumen las relaciones lineales entre esfuerzo máximo a flexión ( $\sigma_{max}$ ) y la densidad aparente de fibras ( $\rho$ ) son:

Para CEPAS: 
$$\sigma_{max} = 290,7\rho + 32 \tag{9}$$

para BASAS 
$$\sigma_{max} = 24,2\rho + 88 \tag{10}$$

para SOBREBASAS: 
$$\sigma_{max} = 416\rho + 80 \tag{11}$$

### 4.3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN PARALELA A LA FIBRA VS. DENSIDAD APARENTE DE FIBRAS

Finalmente, el esfuerzo resistente a tracción de la GAK en relación con la densidad aparente de fibras mostró un comportamiento diferenciado de los anteriores analizados en este trabajo.

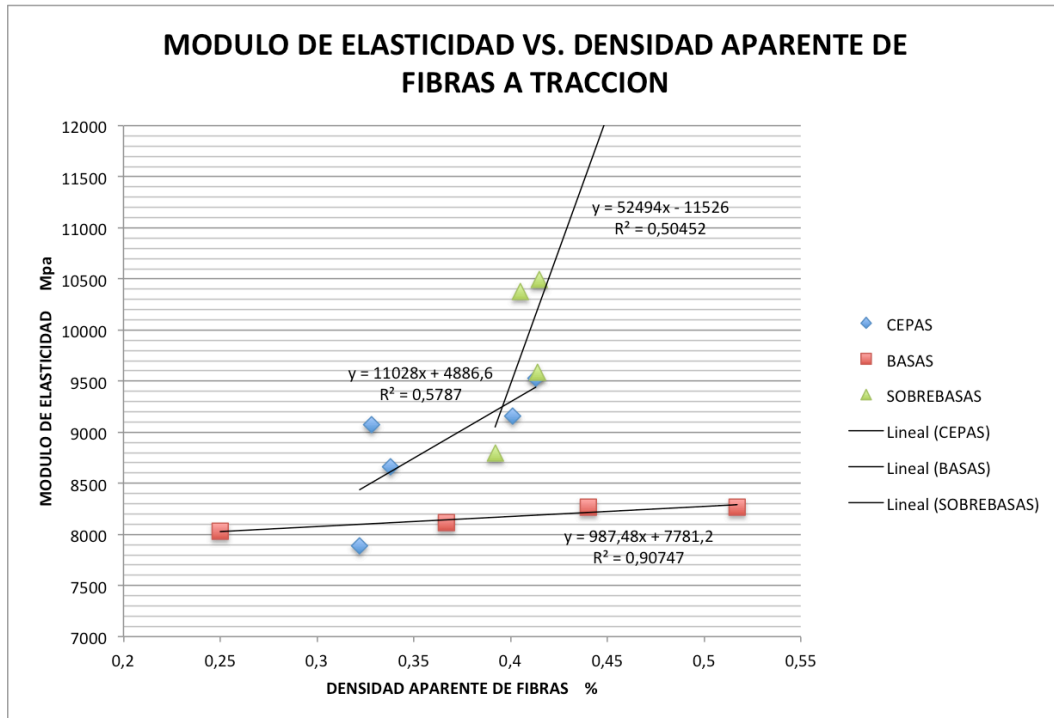


Figura 54. Módulo de elasticidad a tracción vs. Densidad aparente de fibras de GAK. Fuente: Autor.

En primer lugar, el módulo de elasticidad a tracción longitudinal mostró estar altamente ligado a la densidad aparente de fibras, si éstas se analizan separadas según la altura del culmo (Figura 54).

Las densidades aparentes en éste caso mostraron altas variaciones estándar, mientras que los valores del módulo por tracción se mantuvieron entre los 8000 y 8500 Mpa; este fenómeno indica que en la GAK se pueden presentar grandes variaciones de densidades entre una muestra y otra, incluso si son extraídas de mismo espécimen, lo cual plantea la necesidad de la realización de más pruebas con el fin de ajustar el modelo propuesto.

Las relaciones obtenidas entre el modulo de elasticidad y la densidad aparente de fibras para éste caso fueron las siguientes:

Para CEPAS:  $\epsilon = 11028\rho + 4887$  (12)

para BASAS:  $\epsilon = 988\rho + 7881$  (13)

para SOBREBASAS:  $\epsilon = 52494\rho + 11526$  (14)

En estas ecuaciones, el coeficiente de correlación lineal fué de 0.76 para las Cepas, 0.94 para las Cepas y 0.70 para las Sobrebasas, con lo cual se demuestra que existe un comportamiento directamente proporcional entre las variables, el cual se podría predecir mediante las funciones propuestas.

Por otra parte, el esfuerzo máximo a tracción presenta un comportamiento directamente proporcional a la densidad aparente de fibras, con unos coeficientes de correlación lineal bastante altos, sobretudo en el caso de las basas y sobrebasas ( 0,88 y 0,86) y un poco menor en el caso de las cepas (0,68) (figura 55).

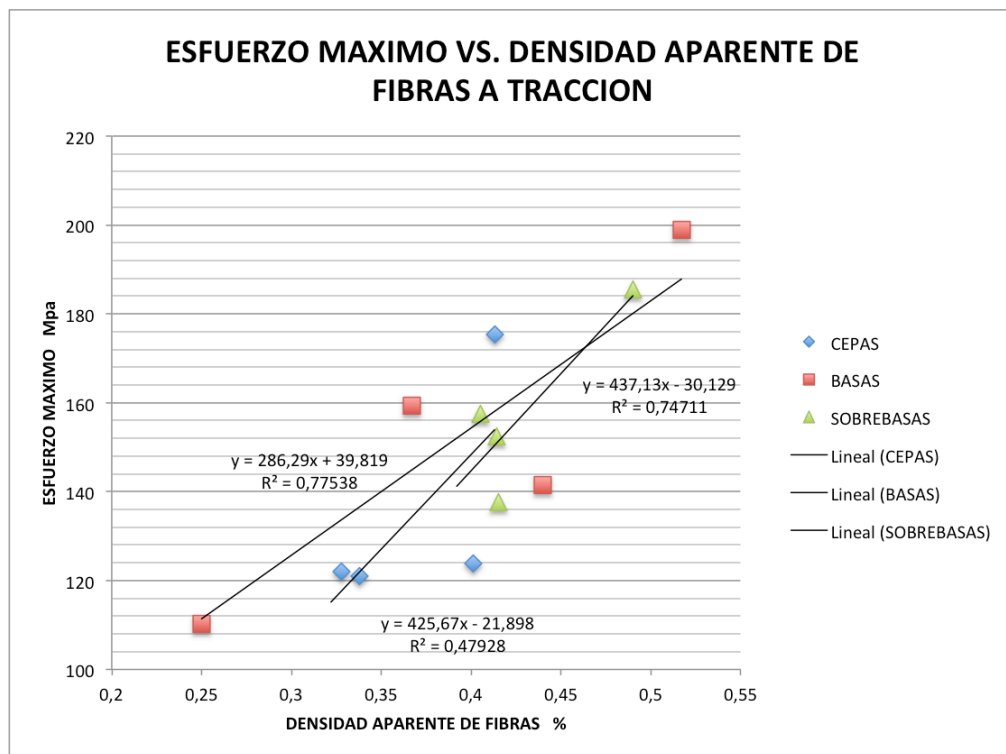


Figura 55. Esfuerzo máximo a tracción vs. Densidad aparente de fibras de GAK.  
Fuente: Autor.

Las relaciones obtenidas a partir de estas regresiones son las siguientes:

Para CEPAS:  $\sigma_{max} = 426\rho - 21,9$  (15)

para BASAS  $\sigma_{max} = 286,3\rho + 39,8$  (16)

para SOBREBASAS:  $\sigma_{max} = 437,1\rho - 30,1$  (17)

En donde  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo a flexión y  $\rho$  es la densidad aparente de fibras.

Ahora bien, analizando la figura 55, se puede observar un comportamiento con tendencia directamente proporcional entre las variables, aun considerando todas las muestras; al hacer la unificación de los puntos de regresión para este caso, fue posible plantear una única ecuación de regresión con un coeficiente de correlación lineal de 0,82 (Figura 56).

La ecuación que resulta de esta regresión es la mostrada a continuación:

Para TODAS:  $\sigma_{max} = 321,4\rho + 20,8$  (18)

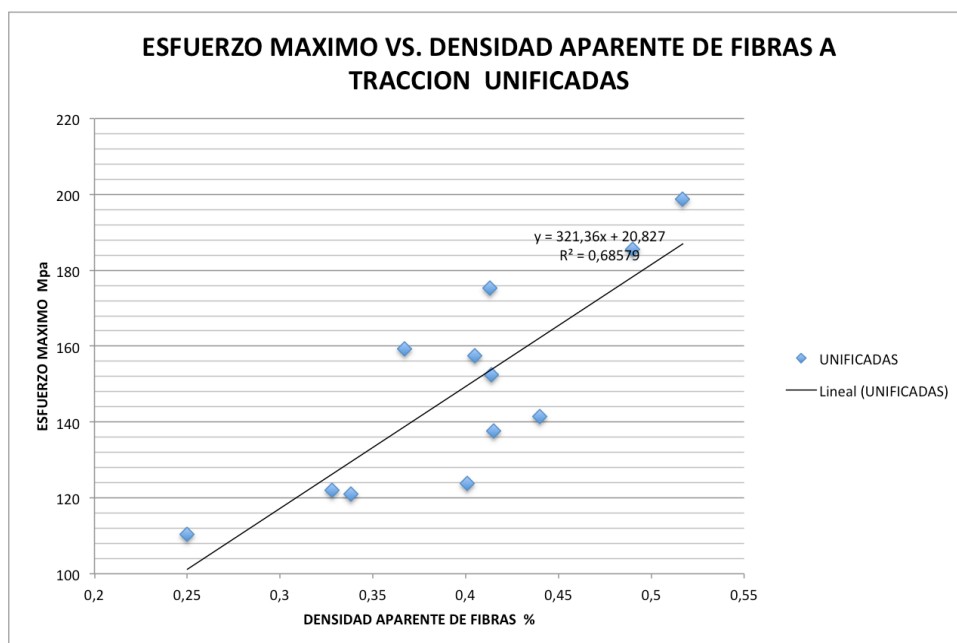


Figura 56. Esfuerzo máximo a tracción vs. Densidad aparente de fibras unificando muestras de Cepas , Basas y Sobrebasas de GAK. Fuente: Autor.

Este resultado puede tener varias interpretaciones; en primer lugar que la GAK, cuando se trata de elementos sometidos a tracción, tiende a ofrecer la misma respuesta mecánica, independiente de la altura de la sección de extracción de la muestra, lo cual resulta muy favorable en términos de aplicaciones de ingeniería y de apropiación tecnología para la producción de elementos estructurales a partir de este material.

Como se mencionó al principio de este capítulo, para la realización del ensayo de tracción longitudinal, la preparación de la probeta requiere que cerca de un 60% de la sección transversal se desbaste para la conformación de la zona de ensayo o *gage length* (Figura 47), por lo que se pudieron presentar variaciones en los valores de las densidades aparentes de la zona débil que pudieron haber afectado los resultados, por tanto se deberán tomar tanto las regresiones separadas como la unificada para hacer la validación de los modelos.

#### 4.3.4 SELECCIÓN DEL MODELO A UTILIZARSE PARA LA PROYECCIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

En el presente trabajo se plantean ecuaciones de tipo lineal para relacionar la densidad aparente de fibras con las propiedades mecánicas esperadas de la GAK ante distintos tipos de esfuerzos. Los modelos se plantearon diferenciando la altura de la sección de donde se extrae la muestra a ensayar en tres tipos: Cepas, Basas y Sobrebasas.

Los modelos podrían eventualmente utilizarse para predecir el comportamiento mecánico de una muestra de GAK a partir de la determinación de la densidad aparente de fibras, faltando por definir en el modelo, el tipo de relación a usarse en cada caso. Si bien es cierto que la GAK se puede clasificar según la altura del tramo, en este estudio se encontraron muestras que dimensionalmente podrían ser confusas en cuanto a dicha clasificación: por ejemplo una muestra puede tener un diámetro exterior mayor a 15 cm con un espesor de 10 mm, en este caso en particular, el diámetro es típico de una Cepa, pero el espesor corresponde más a una Basa o Sobrebasa.

De manera similar, otra muestra podría tener un espesor importante, más de 15 mm, con un diámetro exterior menor a los 11 cm.

Se encontró que es posible hallar una relación entre el diámetro exterior o radio y el espesor de la sección. Estas relaciones de proporcionalidad se especificaron en la Tabla 11 del capítulo 4.

|            | relación<br>Radio exterior/espesor |
|------------|------------------------------------|
| CEPAS      | 3,83± 0,54                         |
| BASAS      | 4,89± 0,66                         |
| SOBREBASAS | 5,70± 0,71                         |

Tabla 17. Relación entre radio exterior y espesor de sección transversal de GAK. Fuente: Autor.

En la tabla 17, se observa la relación dimensional entre radio exterior y espesor de sección transversal, al analizar sus valores se puede concluir que un valor de radio exterior aproximado de 4 veces el espesor, nos permitiría usar las relaciones planteadas para las Cepas, mientras que un valor cercano a 5 veces, podría plantearse para las basas y uno de 6 veces se adaptaría a las Sobrebasas. Estas magnitudes de proporcionalidad serían muy importantes al clasificar una sección, si no se cuenta con la información suficiente sobre el tipo de muestra que se tiene, o si se tiene alguna duda acerca de la misma.

Este procedimiento es simple, pero puede ser muy útil en el propósito de la clasificación de las secciones, lo cual amerita hacer estudios más amplios sobre este particular.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una relación lineal entre tres diferentes propiedades físicas de la GAK y las propiedades mecánicas más representativas de la misma ante tres diferentes tipos de esfuerzos.

Con el fin de entender de la mejor manera posible esta relación entre variables físicas y propiedades mecánicas de la GAK, y por otra parte contribuir al planteamiento de una metodología alternativa para su caracterización, se utilizaron como variables físicas de estudio el diámetro exterior, su espesor y la densidad aparente de fibras en cada sección observada; en el proceso de su determinación se llegó a las siguientes conclusiones:

- El diámetro exterior y el espesor de la GAK guardan, en términos generales, una relación de proporcionalidad, es decir, que con el aumento del diámetro lo hace también el espesor. Sin embargo, esta relación no se puede considerar lineal a lo largo de todo el culmo sino por tramos separados por la altura, es decir en Cepas, Basas y Sobrebasas.
- La densidad aparente de fibras por su parte, varía de manera directa al espesor e inversa al diámetro exterior, y sus valores se ubicaron en promedio entre un 36% y un 42% del total del área transversal observada.
- La densidad aparente de fibras, además, mostró un comportamiento directamente proporcional al área observada en la dirección radial. Sus valores no dependen de la sección angular tomada para su determinación, siempre y cuando esta sea radial, es decir entre los diámetros exterior e interior.

Una vez llevada a cabo la caracterización física de la GAK en las tres diferentes alturas, se procedió a determinar las propiedades mecánicas ante las sollicitaciones de compresión, flexión y tracción paralelas a la fibra.

La razón que motivó el análisis del comportamiento mecánico entre estos tres tipos de sollicitaciones fue determinar la diferencia en su comportamiento

ortotrópico, además de establecer una relación entre las propiedades obtenidas por este método y las propiedades mecánicas de estudio. Relacionado con estas actividades se hicieron varios análisis que están detallados en los capítulos 4 y 5 del presente trabajo y se llegó a las siguientes conclusiones:

- La GAK presenta un comportamiento mecánico diferenciado dependiendo de la dirección en la que se aplique la carga, igualmente depende del tramo (cepa, Basa o Sobrebasa) y de la cara sobre la cual se aplique dicha carga, por lo cual se deberían tener en cuenta todas estas variables a la hora de buscarle aplicaciones estructurales específicas a este material.
- En los ensayos de compresión los valores más altos de carga aplicada se observaron en las cepas, lo cual es lógico teniendo en cuenta que fueron las muestras de mayor área de sección, sin embargo resultaron ser los de menores valores de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad, lo cual está directamente relacionado con la menor densidad aparente de fibras en sus secciones.
- En los ensayos de flexión se encontró el comportamiento mas coherente, con valores que estuvieron entre 65 MPa y 103 MPa promedio para los esfuerzos máximos y entre 8990 MPa y 11500 MPa para los módulos de elasticidad.
- Los resultados del ensayo a flexión fueron totalmente diferentes a los otros dos ensayos en donde el esfuerzo de rotura se pudo determinar de manera precisa. En estos, el punto de fractura se estableció como un porcentaje de la carga máxima resistida por la probeta; como se observó, en este tipo de ensayos el material tuvo una forma de falla dúctil.
- En los ensayos de tracción paralela a la fibra, se obtuvieron valores igualmente elevados de esfuerzos, deformaciones y módulos de elasticidad comparados con los ensayos de compresión paralela a la fibra, sin embargo, no fue posible establecer claramente una relación entre estos

valores y los de densidad aparente de fibras, ya que para el ensayo de tracción se utiliza un sección transversal reducida del material.

- El ensayo que presenta los valores más altos y al mismo tiempo fiables de propiedades mecánicas es el ensayo de flexión.

Finalmente, se debe hacer una reflexión con respecto al tema general del presente trabajo. El objetivo principal fué analizar la influencia de la densidad aparente de fibras sobre las propiedades mecánicas de la GAK ante los esfuerzos de Compresión, Flexión y Tracción; con lo cual, se posibilitaría hacer una caracterización físico-mecánica de la Guadua *Angustifolia Kunth*, utilizando como metodología un protocolo basado en microscopía, en vez de la realización de ensayos mecánicos propiamente dichos; lo anterior partiendo de que otros posibles factores que pudieran afectar los resultados no fueron tenidos en cuenta, como la edad de los especímenes, el contenido de humedad de los mismos y del ambiente en donde se encuentren.

En este orden de ideas, relacionar las variables físicas estudiadas y las propiedades mecánicas ante los diferentes esfuerzos no es posible de acuerdo a los resultados encontrados, ya que la altura de la sección influye sobre todas las demás variables y su comportamiento no es lineal; por esta razón, se optó por expresar esas relaciones en tres diferentes funciones lineales discriminadas según la relación entre el diámetro exterior de la sección y su espesor respectivo.

Si se logra establecer una relación entre el espesor de la sección y las propiedades mecánicas a nivel superficial de las caras exterior e interior de la sección observada, por ejemplo a nivel de dureza, se podría hacer una relación más directa entre esta variable física dimensional con las propiedades mecánicas de la sección respectiva, sin depender del diámetro exterior, con lo cual se podría explorar la posibilidad de aplicar este método a otras variedades de bambú guadua, sobretodo las que puedan tener mayores aplicaciones como material estructural, principalmente las de espesores de más de 10 mm, ya que a mayor espesor, mayor es el volumen de material compuesto laminado que se puede elaborar a partir del material.

En cuanto a las recomendaciones, para validar el modelo propuesto se recomienda llevar a cabo más estudios con diferentes tipos de probetas seleccionados al azar, o bien hacer un estudio más amplio en donde con un número de muestras suficiente, cercana o mayor de cien preferiblemente, se relacionen tres variables al mismo tiempo, dos de ellas, el espesor y el diámetro exterior, y la tercera la densidad aparente y las demás propiedades mecánicas estudiadas.

De esta manera se puede lograr en una sola función, relacionar tres de las variables más importantes de este estudio, pero como se mencionó anteriormente, se requiere que el número de muestras analizado sea mucho mayor.

Una reflexión final acerca de la aproximación al conocimiento que sobre este material pretende este trabajo es la siguiente:

*“La guadua será un material de ingeniería en la medida en que dilucidemos los mecanismos que gobiernan su comportamiento y nos adaptemos a ellos para hacer las mas eficientes aplicaciones”*

## CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] QISHENG, ZHANG ; SHENXUE, JIANG ; YONGYU, TNAG; Industrial utilization of bamboo; Technical report n°26, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 2002.

[2] LONDOÑO, XIMENA; A decade of observations of a *Guadua angustifolia* plantation in Colombia. Journal of American Bamboo Society; vol. 12(1):37-43; 1998.

[3] GIRALDO, E; SABOGAL, A.; Una alternativa sostenible: La Guadua. Técnicas de cultivo y manejo. Ed. Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q. Colombia. 192 p, 1999.

[4] LONDOÑO, XIMENA; CAMAYO; GLORIA C.; NÉSTOR M. RIAÑO, NESTOR M.; LÓPEZ, YAMEL; Caracterización anatómica del culmo de *Guadua Angustifolia Kunth* (Poaceae: Bambusoideae); Journal of American Bamboo Society; vol. 16(1): 18-31; 2002.

[5] LIESE, WALTER; The anatomy of bamboo culms; Technical report n° 10, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 1998.

[6] JANSSEN, JULES; Designing and building with bamboo; Technical report n°20, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 2000.

[7] AHMAD M.; KAMKE, F.A.; Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: physical and mechanical properties, Wood Science and Technology, vol. 39: 448–459, 2005.

[8] Li X., Physical, Chemical, and Mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing, Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agriculture, Master degree of Science, 1999.

[9] LIESE W., The structure of Bamboo in relation to its properties and utilization, International Symposium on industrial use of bamboo, Beijing, China, 1992.

[10] GONZALEZ, HECTOR A.; MONTOYA, JORGE A.; BEDOYA, JOSE R.; comportamiento de muestras de guadua *angustifolia kunth* con diafragma y sin diafragma sometidas a esfuerzo de compresión; Revista Scientia et Technica Año XIV, No 38, Junio 2008. Universidad Tecnológica de Pereira; Pereira, Colombia; 2008.

[11] GONZALEZ, CESAR E.; Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua *angustifolia* y determinación del modulo de elasticidad; Revista Ingeniería y Universidad; enero-junio; año/vol.11, numero 001; Pontificia Universidad javeriana; Bogotá, Colombia; pp. 89-103. ; 2007.

[12] OSORIO, JAIRO A.; CIRO, HECTOR J.; VELEZ, JUAN M.; Efectos de algunos parámetros físicos y geométricos en la resistencia de diseño a flexión de la guadua *angustifolia kunth*; Dyna; Año 72, Nro. 145, pp. 37-44. Medellín; 2005.

[13] GONZALEZ, HECTOR A.; MONTOYA, JORGE A.; BEDOYA, JOSE R.; resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *guadua angustifolia kunth*; Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira; Pereira; 2007.

[14] CIRO, HECTOR J.; OSORIO, JAIRO A.; VELEZ, JUAN M.; determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *guadua angustifolia kunth*; Revista Facultad Nacional de Agronomía; vol. 58, núm. 1; Universidad Nacional de Colombia; Medellín, Colombia; 2005.

- [15] LO, TOMMY; CUI, H.Z.; H.C. LEUNG, H.C.; The effect of fiber density on strength capacity of bamboo; Elsevier, Materials Letters; City University of Hong Kong; Hong Kong, China; 2004.
- [16] YU, HUAQIANG; FEI, BENHUA; REN, HAIQING; JIANG, ZEHUI; LIU, XING'E; Variation in tensile properties and relationship between tensile properties and air-dried density for moso bamboo; Springer-Verlag; Beijing, China; 2008.
- [17] YU H. Q., JIANG Z. H., HSE C. Y., SHUPE T. F.; selected physical and mechanical properties of moso bamboo (*phyllostachys pubescens*); Journal of Tropical Forest Science; *Louisiana State University LA, USA*; 2008.
- [18] JANSSEN, JULES; Bamboo in building structures; Inbar Technical report n° 26; University of Eindhoven; 253 p.; 1981.
- [19] LÓPEZ, LUIS F., CORREAL, JUAN F.; Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua Angustifolia* como material estructural; revista maderas Ciencia y Tecnología; Universidad Del Bio Bio; 11(3): 171-182 ; Chile; 2009.
- [20] LONDOÑO P., XIMENA; Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo; Maestría en Construcción - Modulo *Guadua*, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá; Agosto de 2002.
- [21] MONTOYA ARANGO JORGE AUGUSTO , OROZCO HINCAPIE CARLOS ALBERTO; Fundamentos prácticos del secado de *guadua-bambú*, proyecto de la energía solar para el secado industrial de la *guadua angustifolia*; ed. Colciencias-universidad tecnológica de Pereira; Pereira; 2008.
- [22] NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 5525: métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua Angustifolia Kunth*; Ed. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación; Bogotá, Colombia; 2007.

[23] STAMM, JOERG; Proyecto latas y laminados de guadua, cooperación Alemana al desarrollo GTZ, universidad tecnológica de Pereira UTP, marzo de 2002.

[24] MONTOYA, JORGE A.; GONZALEZ, HECTOR A.; BEDOYA, JOSE R.; Dureza Brinell y la influencia de la humedad relativa del ambiente, de la edad y la Altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *Guadua Angustifolia Kunth*; *Sciencia Et Technica*, mayo, Año/vol. XIII, Numero 034; Universidad Tecnológica de Pereira; pp. 619-624; Pereira, Colombia; 2007.

[25] GUTIERREZ, JUAN V.; LOZANO GOMEZ B. RAUL; Diseño y elaboración a escala natural de armaduras en *Guadua Angustifolia*; Tesis para optar al título de Ingeniero Civil; Director: Caori P. Takeuchi Tan; departamento de Ingeniería Civil; Universidad Nacional de Colombia; Bogotá; 2002.

[26] LONDOÑO, XIMENA; La subtribu *Guaduinae* de América; Sociedad Colombiana del Bambú; Universidad del Quindío; Armenia; 2004.

[27] GONZALEZ, EUGENIA; DÍAZ, JOHN; Propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua*; Universidad Nacional sede Medellín; Facultad de Ciencias Agropecuarias; p.4.; 1992.

[28] CALLISTER JR., WILLIAM D.; Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2ª Ed.; Editorial Limusa Wiley; pp. 159.; México; 2009.

[29] Prüfung von Holz Biegeversuch DIN 52 186; Deutsches Institut für Normung e. V., 3 pp.;1976.

[30] Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber ASTM D-143; ASTM international; 2007.

## BIBLIOGRAFÍA

AHMAD M.; KAMKE, F.A.; Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: physical and mechanical properties, Wood Science and Technology, vol. 39: 448–459, 2005.

CALLISTER JR., WILLIAM D.; Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2ª Ed.; Editorial Limusa Wiley; pp. 159.; México; 2009.

CIRO, HECTOR J.; OSORIO, JAIRO A.; VELEZ, JUAN M.; determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *guadua angustifolia* kunth; Revista Facultad Nacional de Agronomía; vol. 58, núm. 1; Universidad Nacional de Colombia; Medellín, Colombia; 2005.

GIRALDO, E; SABOGAL, A.; Una alternativa sostenible: La Guadua. Técnicas de cultivo y manejo. Ed. Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q. Colombia. 192 p, 1999.

GONZALEZ, CESAR E.; Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *guadua angustifolia* y determinación del modulo de elasticidad; Revista Ingeniería y Universidad; enero-junio; año/vol.11, numero 001; Pontificia Universidad javeriana; Bogotá, Colombia; pp. 89-103. ; 2007.

GONZALEZ, EUGENIA; DÍAZ, JOHN; Propiedades físicas y mecánicas de la Guadua; Universidad Nacional sede Medellín; Facultad de Ciencias Agropecuarias; p.4.; 1992.

GONZALEZ, HECTOR A.; MONTOYA, JORGE A.; BEDOYA, JOSE R.; comportamiento de muestras de *guadua angustifolia kunth* con diafragma y sin diafragma sometidas a esfuerzo de compresión; Revista Scientia et Technica Año XIV, No 38, Junio 2008. Universidad Tecnológica de Pereira; Pereira, Colombia; 2008.

GONZALEZ, HECTOR A.; MONTOYA, JORGE A.; BEDOYA, JOSE R.; resultados del ensayo a flexión en muestras de bambú de la especie *guadua angustifolia* kunth; Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira; Pereira; 2007.

GUTIERREZ, JUAN V.; LOZANO GOMEZ B. RAUL; Diseño y elaboración a escala natural de armaduras en Guadua Angustifolia; Tesis para optar al título de Ingeniero Civil; Director: Caori P. Takeuchi Tan; departamento de Ingeniera Civil; Universidad Nacional de Colombia; Bogotá; 2002.

JANSSEN, JULES; Bamboo in building structures; Inbar Technical report nº 26; University of Eindhoven; 253 p.; 1981.

JANSSEN, JULES; Designing and building with bamboo; Technical report nº20, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 2000.

Li X., Physical, Chemical, and Mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing, Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agriculture, Master degree of Science, 1999.

LIESE W., The structure of Bamboo in relation to its properties and utilization, International Symposium on industrial use of bamboo, Beijing, China, 1992.

LIESE, WALTER; The anatomy of bamboo culms; Technical report nº 10, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 1998.

LO, TOMMY; CUI, H.Z.; H.C. LEUNG, H.C.; The effect of fiber density on strength capacity of bamboo; Elsevier, Materials Letters; City University of Hong Kong; Hong Kong, China; 2004.

LONDOÑO P., XIMENA; Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo; Maestría en Construcción - Modulo Guadua, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá; Agosto de 2002.

LONDOÑO, XIMENA; A decade of observations of a *Guadua angustifolia* plantation in Colombia. Journal of American Bamboo Society; vol. 12(1):37-43; 1998.

LONDOÑO, XIMENA; CAMAYO; GLORIA C.; NÉSTOR M. RIAÑO, NESTOR M.; LÓPEZ, YAMEL; Caracterización anatómica del culmo de *Guadua Angustifolia Kunth* (Poaceae: Bambusoideae); Journal of American Bamboo Society; vol. 16(1): 18-31; 2002.

LONDOÑO, XIMENA; La subtribu Guaduinae de América; Sociedad Colombiana del Bambú; Universidad del Quindío; Armenia; 2004.

LÓPEZ, LUIS F., CORREAL, JUAN F.; Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua Angustifolia* como material estructural; revista maderas Ciencia y Tecnología; Universidad Del Bio Bio; 11(3): 171-182 ; Chile; 2009.

MONTOYA ARANGO JORGE AUGUSTO , OROZCO HINCAPIE CARLOS ALBERTO; Fundamentos prácticos del secado de guadua-bambú, proyecto de la energía solar para el secado industrial de la guadua angustifolia; ed. Colciencias-universidad tecnológica de Pereira; Pereira; 2008.

MONTOYA, JORGE A.; GONZALEZ, HECTOR A.; BEDOYA, JOSE R.; Dureza Brinell y la influencia de la humedad relativa del ambiente, de la edad y la Altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *Guadua Angustifolia Kunth*; Sciencia Et Technica, mayo, Año/vol. XIII, Numero 034; Universidad Tecnológica de Pereira; pp. 619-624; Pereira, Colombia; 2007.

NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 5525: métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua *Angustifolia Kunth*; Ed. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación; Bogotá, Colombia; 2007.

OSORIO, JAIRO A.; CIRO, HECTOR J.; VELEZ, JUAN M.; Efectos de algunos parámetros físicos y geométricos en la resistencia de diseño a flexión de la Guadua *angustifolia kunth*; Dyna; Año 72, Nro. 145, pp. 37-44. Medellín; 2005.

Prüfung von Holz Biegeversuch DIN 52 186; Deutsches Institut für Normung e. V., 3 pp.;1976.

QISHENG, ZHANG ; SHENXUE, JIANG ; YONGYU, TNAG; Industrial utilization of bamboo; Technical report n°26, international network for bamboo and rattan; Beijing, Eindhoven, Nueva Delhi; 2002.

STAMM, JOERG; Proyecto latas y laminados de Guadua, cooperación Alemana al desarrollo GTZ, universidad tecnológica de Pereira UTP, marzo de 2002.

Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber ASTM D-143; ASTM international; 2007.

YU H. Q., JIANG Z. H., HSE C. Y., SHUPE T. F.; selected physical and mechanical properties of moso bamboo (*phyllostachys pubescens*); Journal of Tropical Forest Science; *Louisiana State University LA, USA*; 2008.

YU, HUAQIANG; FEI, BENHUA; REN, HAIQING; JIANG, ZEHUI; LIU, XING'E; Variation in tensile properties and relationship between tensile properties and air-dried density for moso bamboo; Springer-Verlag; Beijing, China; 2008.