

ESTRUCTURA INTERNA DE LA GUADUA Y SU INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

INTERNAL STRUCTURE OF THE GUADUA AND ITS INCIDENCE IN THE MECHANICAL PROPERTIES

JAIRO ALEXANDER OSORIO

Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, aosorio@unal.edu.co

JUAN MANUEL VÉLEZ

Profesor Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

HÉCTOR JOSÉ CIRO

Profesor Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Recibido para revisar Octubre 24 de 2006, aceptado abril 27 de 2007, versión final mayo 15 de 2007

RESUMEN: La Guadua angustifolia kunth GAK, fue caracterizada en su estructura interna, y se encontró la incidencia que presenta esta en la resistencia a flexión y a tensión. La resistencia a la flexión disminuye de la capa externa a la interna, debido a la reducción de la cantidad de células de fibras en ese sentido. Los valores de resistencia a flexión en la GAK disminuyen con la presencia de nudos debido a la discontinuidad de las fibras en esa parte del material. La resistencia a la tensión al igual que la de flexión disminuye de la capa externa a la interna, aspecto que se relaciona con que la cantidad de las células de fibra disminuyen hacia la capa interna.

PALABRAS CLAVE: Guadua angustifolia kunth, propiedades mecánicas, microestructura.

ABSTRACT: The Guadua angustifolia kunth GAK, was characterized in its microstructure, and founded the effect that this one presents in the resistance to flexion and to stress. The resistance to the flexion diminishes from the external to the internal layer, due to the reduction of the quantity of cells of fibers in this direction. The resistance to flexion values in the GAK diminishes with the presence of nodes due to the discontinuity of the fibers in this part of the material. The resistance to the stress as that of flexion diminishes of the external to the internal layer, aspect that relates that the quantity of the cells of fiber diminishes towards the internal layer.

KEY WORDS: Guadua angustifolia kunth, mechanical properties, microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la cultura del eje cafetero y últimamente en Departamentos como Cundinamarca y Antioquia es común el uso de la Guadua angustifolia kunth (GAK) en diversas aplicaciones, principalmente en sistemas constructivos y en la fabricación de laminados.

Este amplio uso del material, ha promovido el desarrollo de investigaciones tanto nacionales como internacionales, orientadas principalmente al conocimiento estructural de los elementos y

Otras hacia el estudio anatómico, como las realizadas por Liese (1998) en diferentes bambúes y por Londoño et al(2002). Así, esta serie de investigaciones han demostrado que la guadua posee propiedades estructurales sobresalientes que la clasifican como clase B, de acuerdo al sistema de clasificación de maderas, y por tanto es utilizada para la construcción de viviendas, puentes y estructuras de soportes entre otros.

Sin embargo, el estudio de la GAK, con el fin de entender la relación que existe entre la estructura interna y la resistencia cuando es sometida a diferentes esfuerzos, especialmente los de flexión y tensión que son los que mayormente se presentan en estructuras, no ha sido investigado.

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

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

- **Resistencia a Flexión.**

Ahmad (2000), ajustó las normas ASTM 143-94 para pequeñas probetas, y propuso la siguiente ecuación para obtener la resistencia máxima (MOR):

$$MOR = M_{Max} / Z (N / mm^2) \quad (1)$$

En donde M_{Max} es el momento flector en la carga máxima (N-mm), y Z es módulo de la sección (mm^3).

Debido a la anisotropía del bambú, Ahmad (2000) propone realizar ensayos a flexión tanto en el sentido radial como tangencial, con el fin de tener una buena aproximación al comportamiento del material (Ver Figura 1).

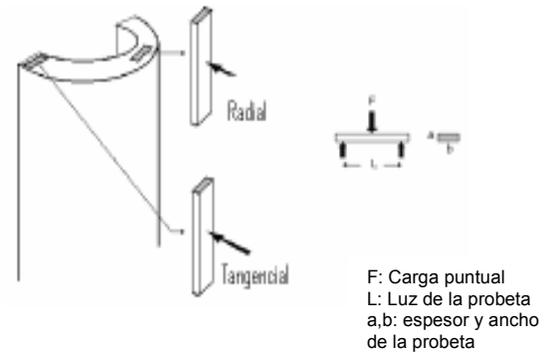


Figura 1. Probeta para realizar ensayos a flexión con cargas radiales y tangenciales sobre el material (Ahmad, 2000).

Figure 1. Test tube to make tests to flexion with radial and tangential loads on the material (Ahmad, 2000).

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

$$SPL_i = 91,2 \text{ N/mm}^2$$

$$SPL_n = 101,0 \text{ N/mm}^2$$

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

- **Resistencia a tensión**

Para las pruebas a tensión, el INBAR sugiere utilizar las probetas representadas en la Figura 2:

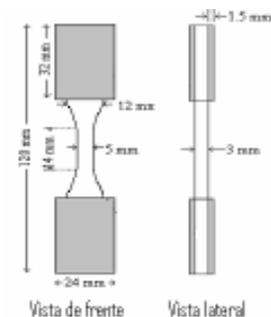


Figura 2. Probetas de guadua a tensión (INBAR, 1999). A. Vista de frente. B. Vista lateral

Figure 2. Test tubes of guadua to tension (INBAR, 1999). A. Vista front. B. lateral Vista

El esfuerzo Máximo (MOR) se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

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

En donde P_{Max} es la carga máxima (N) y A es el área (mm^2). El área es la medida de la sección transversal en la contracción, con un ancho fijo de 5 mm y el espesor de la pared del elemento.

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

Zen, Li, Zho (1992) citado por Hidalgo (2003), realizó pruebas a tensión en bambúes, analizando la influencia del internudo sobre la resistencia final del elemento. En la Tabla 1, se observa que la resistencia de las probetas sin nudos, es decir en el internudo puede llegar a ser aproximadamente un 19,2% más bajas que aquellas que presentan nudos.

Tabla 1. Resistencia a tensión del bambú con la presencia o ausencia de nudos.

Table 1. Resistance to tension of the bamboo with the presence or absence of knots.

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

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

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

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

A través de la pared del culmo en otros bambúes, el porcentaje de fibra decrece de la zona externa a la interna, mientras que el porcentaje de parénquima es mayor en la zona interna que en la externa. El porcentaje de tejido conductivo crece de la zona externa a la interna (Liese, 1998).

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

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

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

Wang Zheng Guo Wenjing (2002), encontró una distribución de fibras en el culmo del bambú *Yunnanicus*, en donde se diferenciaron una serie de fibras largas y cortas.

Tanto Londoño et al. (2002) como Liese (1998), concuerdan en describir que a nivel anatómico las partes de la estructura de los bambúes que mayor influencia presentan en el comportamiento mecánico de los mismos son el porcentaje de fibras, el porcentaje de los tejidos conductivos y el porcentaje de parénquima, sin llegar a describir el porque de dicha afirmación.

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

Moreno et al. (2004) en GAK encontraron que la resistencia a tensión de la fibra es de 560 MPa. Wegst et al (1993) en bambú, reporto que la resistencia a tensión de la fibra es 610 MPa y de la matriz (parénquima y tejido conductivo) de 50 MPa, como se observa en la figura 3.

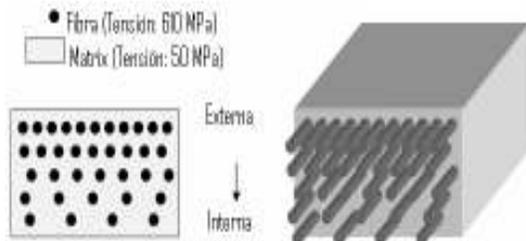


Figura 3. Resistencia a tensión de la matriz y fibra del bambú

Figure 3. Resistance to tension of the matrix and fiber of the bamboo

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización

El presente trabajo se llevó a cabo en el laboratorio de Metalografía, Microscopia Avanzada y de Construcciones Rurales, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

2.2 Metodología

El material utilizado correspondió a culmos de *Guadua angustifolia kunth*, forma cebolla, con edades promedio de 5 años, provenientes de Cocorná-Antioquia.

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

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

La sección transversal de la guadua se dividió en tres capas o zonas, debido a que en los análisis preliminares se observó que las dos primeras no presentan una alta variabilidad desde el punto de vista mecánico: Periferia y transición que se denominó como zona externa y correspondió al 15 % del espesor total; la zona media con un 75 % del espesor total y la zona interior con un 10 % del espesor total (ver Figura 4).

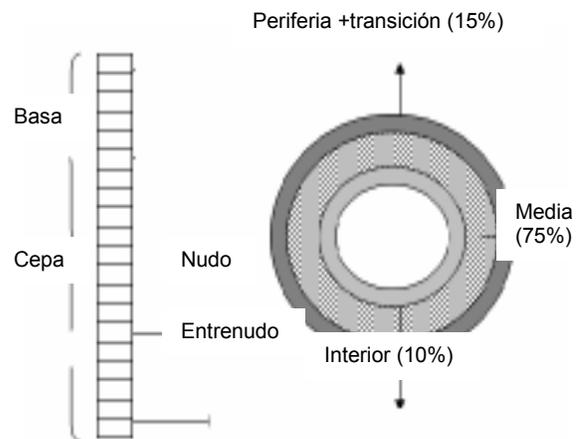


Figura 4. Lugares para la extracción de las probetas. Vista longitudinal y transversal de la pared del culmo

Figure 4. Places for the extraction of the test tubes. Longitudinal and cross-sectional Vista of the wall of culmo

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

Las probetas a tensión fueron dimensionadas de acuerdo a las especificaciones que se dieron a conocer en la Figura 2, en donde la única dimensión variable fue el espesor de la probeta el cual depende propiamente del material.

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

En la Tabla 2, se da a conocer las dimensiones de las probetas falladas a flexión.

Tabla 2. Dimensiones de las probetas falladas a flexión en (cm).

Table 2. Dimensions of the failed test tubes to flexion in (cm).

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

Para la caracterización de la microestructura se utilizó el microscopio electrónico de barrido SEM marca JEOL, donde se obtuvo de la sección transversal probetas de 3 mm de espesor. A las muestras en estado de humedad menores del 10% en base seca, se le retiro en un equipo de vacío la humedad restante y posteriormente se hizo un recubrimiento en oro.

En el análisis microestructural se analizó la estructura del material compuesto, en la unión

parénquima, tejido conductivo y fibra dentro de la matriz.

Se determinó el área de parénquima, el área de fibra y de tejido conductivo en términos de porcentaje en relación con el espesor total del material, a través de la técnica de procesamiento de imágenes, utilizando para ello la herramienta de Matlab versión 5.3.

En la Tabla 3, se muestran las variables obtenidas, así como el número de repeticiones realizadas en los ensayos mecánicos.

Tabla 3. Variables medidas en los ensayos mecánicos a flexión y tensión.

Table 3. Variables measured in the mechanical tests to flexion and tension.

Ensayo	Variable medida en (MPa)	Número de repeticiones
Flexión radial y tangencial	Resistencia máxima	4
Tensión	Resistencia máxima	4

Para determinar el tamaño muestral se hizo una prueba piloto con tres réplicas por tratamiento para las pruebas de Flexión radial y tangencial y las de tensión. Este tamaño se determino por medio de las curvas características de operación, que es una gráfica de la probabilidad de error tipo II contra el parámetro ϕ que refleja la medida en la cual la hipótesis nula es falsa.

Para determinar las posibles relaciones existentes entre la estructura interna del material y las propiedades mecánicas resistencia a tensión y a flexión se realizó un análisis de varianza para observar las diferencias más significativas. A las variables con diferencia significativa se le realizaron comparación múltiple con pruebas DUNCAN a un nivel de significancia del 5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5, muestra la estructura anatómica de la guadua en la cepa y en la basa del elemento,

donde se evidencian además las capas externas, medias e internas que conforman el espesor total. Al obtener las probetas del material realizando un corte transversal, se encontró que el espesor total de la cepa es mayor en promedio que el de la basa a lo largo del culmo o tallo.

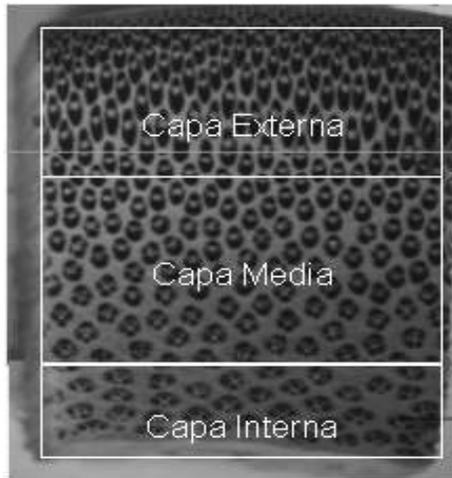


Figura 5. Estructura anatómica del espesor total a 20X

Figure 5. Anatomical structure of the total thickness to 20X

La estructura interna de la GAK en cada una de las capas analizadas, se encuentra conformada por células de parénquima y haces vasculares, los cuales a su vez se componen de tejido conductivo (vasos conductores), de fibras y parénquima (ver figura 6).

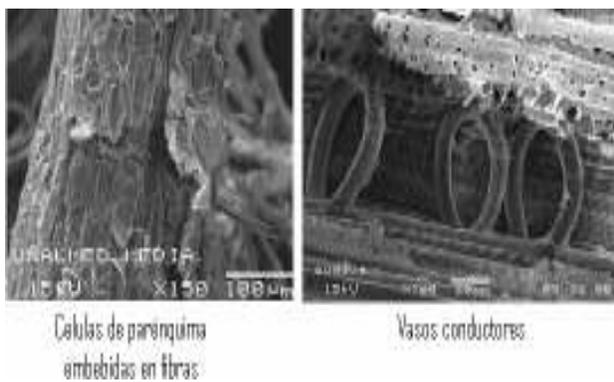


Figura 6. Células de parénquima y vasos conductores en la GAK

Figure 6. Conductive cells of parénquima and glasses in the GAK

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

La Figura 7, muestra la distribución de células de parénquima en la cepa y la basa determinadas por análisis de imagen. Se encontró que el porcentaje de parénquima incrementa de la capa externa a la interna tanto en la cepa como en la basa. Esta distribución de células de parénquima coinciden con las reportadas por Liese (1998), en la pared del *Phyllostachys makinoi* y por Londoño (2002), en GAK forma macana.

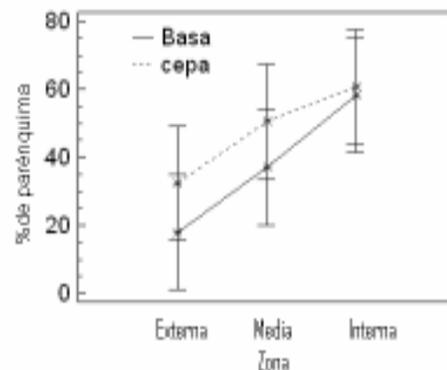


Figura 7. Distribución de células de parénquima con intervalos LSD

Figure 7. Distribution of cells of parénquima with intervals LSD

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

La Tabla 4, muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. El porcentaje de parénquima varió según la zona y las partes. El porcentaje de parénquima en la zona externa es significativamente inferior y diferente a las demás zonas, mientras la cepa presenta un porcentaje de parénquima significativamente mayor que la basa.

Tabla 4. Intervalos múltiples de Duncan para porcentaje de parénquima
Table 4. Multiple intervals of Duncan for percentage of parénquima

Grupos	Media (%)	Límite Inferior (%)	Límite Superior (%)	Número de observaciones	Zona
A	59,03	57,56	60,49	18	Interna
B	43,54	42,07	45,00	18	Media
C	24,87	23,406	26,33	18	Externa

Grupos	Media (%)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Partes
A	47,37	46,17	48,56	27	Cepa
B	37,58	36,39	38,78	27	Basa

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

La Figura 8, da a conocer la distribución de las células de tejido conductivo en término de porcentaje de área del espesor total en la cepa y la basa.

En la cepa el porcentaje de tejido conductivo aumenta de la capa externa a la interna, mientras que en la basa el tejido conductivo disminuye de la capa externa a la media y de ésta se incrementa hacia la interna.

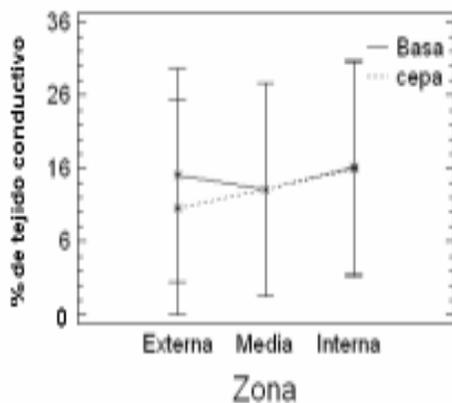


Figura 8. Distribución de tejido conductivo en la cepa y la basa con intervalos LSD
Figure 8. Conductive weave distribution in the stock and the base with intervals LSD

Al realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% se observó que los factores Zona y Partes resultaron significativos (P<0,05). El porcentaje de tejido conductivo es significativamente superior en la basa que en la cepa. Entre la zona externa y media no se presenta diferencia significativa en el porcentaje de tejido conductivo, más si entre la interna y las demás capas (Ver tabla 5).

Tabla 5. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de tejido conductivo
Table 5. Multiple intervals of Duncan for the percentage in the distribution of the conductive weave cells

Grupos	Media (%)	Límite Inferior (%)	Límite Superior (%)	Número de observaciones	Zona
A	16,07	15,15	16,98	18	Interna
B	13,09	12,18	14,01	18	Media
B	12,86	11,94	13,78	18	Externa

Grupos	Media (%)	Límite inferior	Límite superior	Número de observaciones	Partes
A	14,80	14,06	15,55	27	Basa
B	13,21	12,46	13,95	27	Cepa

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

Dentro de los haces vasculares, rodeando el tejido conductivo, se encuentra la zona que contiene las fibras de la GAK. Esas fibras pueden alcanzar la longitud del entrenudo al ser extraídas y tienen diámetros entre los 250 y 550 µm que dependen del tamaño del haz vascular, cuyas características son comunes en fibras naturales, según Schaffer (2000) (ver figura 9).

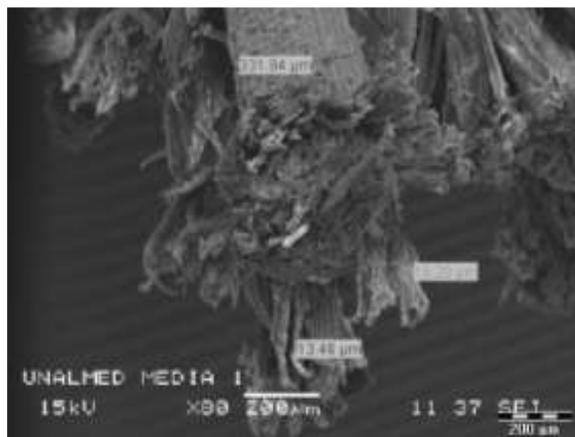


Figura 9. Fibras de GAK
Figure 9. Fibers of GAK

Las fibras son unidas entre sí por células de parénquima. En el extremo de las fibras, se observa que éstas están formadas por unidades menores denominadas células de fibras, que se hallan en tamaños largos y cortos y tienen espesores promedio de 7,05 μm (ver figura 10)

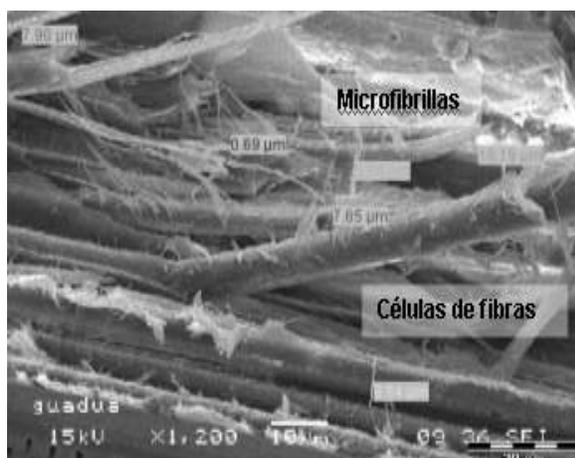


Figura 10. Células de fibras de la GAK
Figure 10. Fiber cells of the GAK

La Figura 11 da a conocer la distribución de las células de fibra en términos del porcentaje de área del espesor total en la cepa y la basa. El porcentaje de fibras tanto en la cepa como en la basa, disminuye de la capa externa a la interna.

En el análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%, se observó que los factores Zona, partes resultaron significativos ($P < 0,05$).

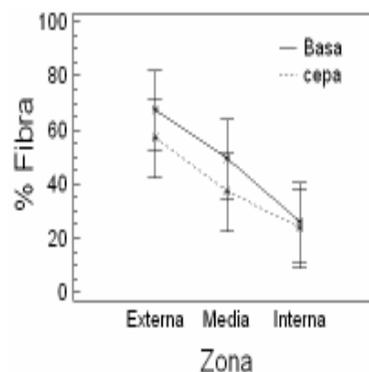


Figura 11. Distribución de células de fibra en la cepa y la basa con intervalos LSD
Figure 11. Distribution of fiber cells in the stock and the base with intervals LSD

La Tabla 6, muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95%. La variable porcentaje en la distribución de las células de fibra varió según la zona presentándose diferencia significativa entre la zona externa, media y la interna, siendo mayor dicho porcentaje en las capa externa de la basa con respecto a la cepa lo que coincide con lo descrito por Tong et.al (1995) en otros bambúes.

Tabla 6. Intervalos múltiples de Duncan para el porcentaje en la distribución de las células de fibra.

Table 6. Multiple intervals of Duncan for the percentage in the distribution of the fiber cells.

Grupos	Mediana (%)	Límite Inferior (%)	Límite Superior (%)	Número de observaciones	Zona
A	62,27	60,92	63,60	18	Externa
B	43,35	42,02	44,69	18	Media
C	24,89	23,56	26,23	18	Interna
Grupos	Mediana (%)	Límite Inferior (%)	Límite Superior (%)	Número de observaciones	Partes
A	47,59	46,50	48,69	27	Basa
B	39,41	38,33	40,50	27	Cepa

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

La Tabla 7 muestra los intervalos múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95% para la resistencia a flexión. La variable resistencia cambió según la zona presentándose diferencia significativa entre la zona externa, media, interna y total, siendo mayor en la capa externa, lo que se debe a que es la que mayor porcentaje de fibras y de contenido de silicio presenta, y se relaciona con una alta resistencia del material. Entre la basa y la cepa tanto con nudos como sin nudos, y en sentido radial y tangencial existen diferencias significativas, lo que permite comprobar la heterogeneidad del material.

Tabla 7. Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia a flexión.

Table 7. Multiple intervals of Duncan for the resistance to flexion

Grupo	Resistencia máxima Media (MPa)	Número de observaciones	Zona
A	249,11	32	Externa
B	76,085	32	Interna
C	101,23	32	Media
D	106,59	32	Total

Grupo	Media (MPa)	Número de observaciones	Nudos
A	138,01	64	Si
B	128,50	64	No

Grupo	Media (MPa)	Número de observaciones	Partes
A	145,42	64	Basa
B	121,09	64	Cepa

Grupo	Media (MPa)	Número de observaciones	Sentido
A	117,78	64	Radial
B	148,74	64	Tangencial

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

La Figura 12, presenta la resistencia bajo cargas radiales y tangenciales, con nudo y sin nudo. La figura muestra que en el sentido radial la resistencia es mayor que la tangencial.

En la zona sin nudo o del entrenudo, la resistencia es menor que en la zona de nudos, en ambas direcciones, radial y tangencial; el comportamiento observado es similar al encontrado por Zhou (1981), en *Phyllostachys pubescens*.

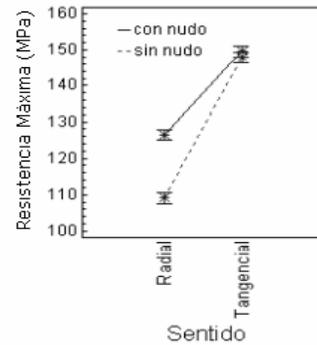


Figura 12. Resistencia radial y tangencial a flexión, con nudo y sin nudo

Figure 12. Radial and tangential resistance to flexion, with knot and without knot

La mayor resistencia en la zona del nudo se debe a una mayor concentración de células de fibras en dicha zona, aspecto también denotado por Liese (1998). La discontinuidad de células de fibras en el nudo ocasiona que la probeta falle súbitamente, comportándose como un material frágil, donde la falla bajo esfuerzos tangenciales y esfuerzos radiales se presenta primero por la ruptura de las células de fibra, aspecto que Amada (2001), denomina “primer rompimiento de las fibras”.

En el entrenudo la probeta falla por aplastamiento bajo cargas tangenciales y radiales (ver figura 13)

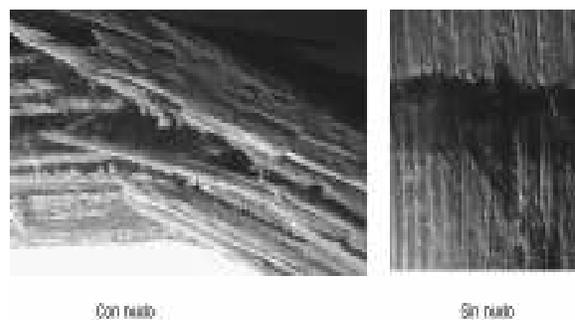


Figura 13. Fallas a flexión con nudo y sin nudo

Figure 13. Faults to flexion with knot and without knot

La Figura 14, muestra la relación de la resistencia máxima a flexión con la estructura interna en el espesor total, la capa externa, media e interna. Se observa que en el espesor total y la capa externa el constituyente que mayor influencia presenta en la resistencia radial y tangencial, tanto en la cepa como en la basa, son las fibras, formadas en su conjunto por las células de fibras; aspecto que se debe a la gran concentración de éstas en dichas zonas.

En la capa media, la mayor incidencia en la resistencia radial y tangencial para la basa y la cepa, se debe a las células de fibras. Lo anterior, se explica por la mayor resistencia que presentan las fibras en comparación con la matriz compuesta por parénquima y tejido conductivo (Moreno et al, 2004 y Wegst et al, 1993), pese a que el contenido de células de fibra y de parénquima son similares en dicha capa.

En la capa interna no se puede afirmar con certeza cual de los constituyentes tienen mayor influencia en la resistencia del material; sin embargo es posible afirmar que el mayor porcentaje del área interna esta compuesta por

parénquima y por lo tanto es de esperarse una menor resistencia asociada a las propiedades previamente descritas del material constitutivo, para definir con precisión cual de los dos materiales influencia más en la resistencia.

La resistencia a la flexión en cada una de las capas analizadas disminuye de la capa externa a la interna, y de la basa hacia la cepa, mostrando la resistencia una relación proporcional al porcentaje de células de fibras e inversamente proporcional al porcentaje de células de parénquima.

La incidencia de cada uno de los constituyentes en la resistencia del material para las diferentes capas, corrobora lo encontrado por Lo et al (2004), sin embargo es necesario tener en cuenta que existen otros aspectos como el arreglo interno de los constituyentes en el compuesto que ejercen influencia en la resistencia final del material.

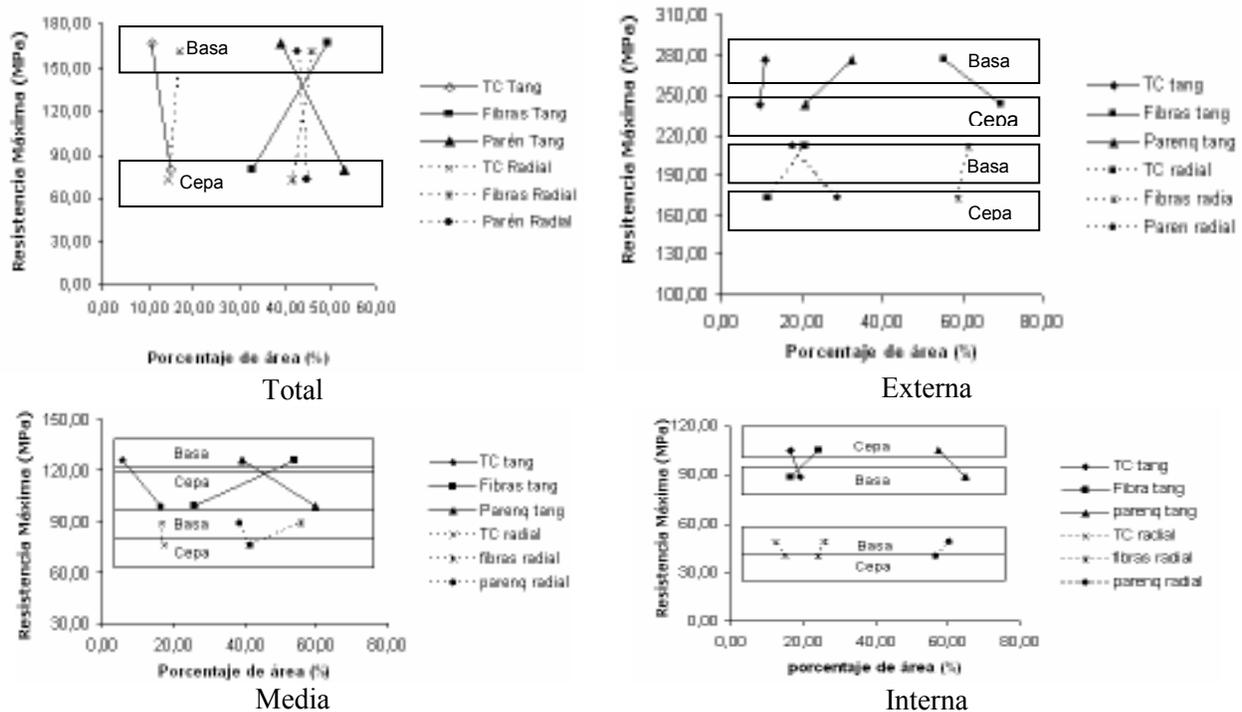


Figura 14. Relación de la resistencia a Flexión con la estructura interna de la GAK
Figure 14. Relation of the resistance to Flexion with the internal structure of the GAK

La Tabla 9, da a conocer los valores de intervalos de Duncan para la resistencia máxima de las probetas sometidas a tensión. La zona total es la que presenta mayor resistencia máxima, existiendo diferencias significativas con la zona interna y no con las demás capas, y de igual manera las probetas sin nudo y extraídas de la

cepa, presentan mayor resistencia máxima que aquellas que tienen nudo y pertenecen a la basa, lo que se debe a un mayor espesor de la pared en la cepa que en la basa, aspecto que coincide por lo anotado por *Ciro et al (2005)*.

Tabla 9. Intervalos múltiples de Duncan para la resistencia máxima a tensión.
Table 9. Multiple intervals of Duncan for the Maxima resistance to tension.

Grupos	Resistencia Máxima Media (Mpa)	Límite Inferior (Mpa)	Límite Superior (Mpa)	Número de observaciones	Zona
A	155,42	139,67	171,16	10	Total
B	89,89	78,94	100,84	12	Media
B	79,81	68,86	90,75	12	Externa
C	58,94	48,70	69,18	14	Interna
A	124,15	114,75	133,54	24	No
B	67,89	60,14	75,62	24	Si
A	108,62	98,92	118,33	22	Cepa
B	83,41	75,92	90,89	26	Basa

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

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

La Figura 15, muestra que la resistencia máxima aumenta de la basa a la cepa, y las probetas sin presencia de nudo presentan mayor resistencia que las con nudos, aspecto que coincide con lo reportado por *Zen Li Zhou (1992)* citado por *Hidalgo (2003)*, y por *Ahmad (2000)*.

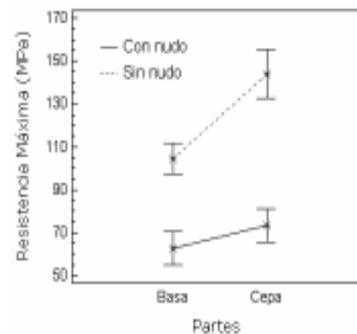


Figura 15. Resistencia máxima a tensión
Figure 15. Maxima resistance to tension

La disminución de la resistencia en el material con nudo respecto al sin nudo bajo cargas de tensión, se debe principalmente a la discontinuidad de las fibras entre el entrenudo y el nudo, convirtiéndose de esta manera el nudo, en un punto de baja resistencia, ocasionando que la probeta falle

súbitamente en el nudo y se comporte como un material frágil, mientras que en las probetas sin nudo se presenta un agrietamiento a lo largo de la probeta que ocasiona la falla del material (ver figura 16)

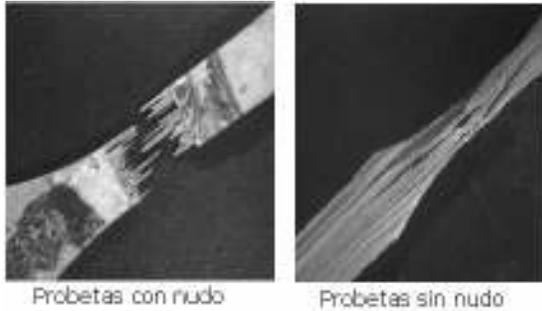


Figura 16. Fallas en probetas tensión
Figure 16. Faults in test tubes tension

La Figura 17, muestra la relación entre la resistencia a tensión y la estructura interna del material. Se observa que para espesor total, la zona externa, y la zona media, el constituyente

que mayor influencia presenta en la resistencia radial y tangencial, tanto en la cepa como en la basa, son las células de fibras; aspecto que se debe a la gran concentración de éstas en dichas zonas, coincidiendo esto con lo descrito por Tong J Ren (1995) citados por Hidalgo (2003) y por Amada et al. (2001).

En la capa interna se presenta un comportamiento similar a lo observado en la prueba de resistencia a la flexión

La resistencia a la tensión en cada una de las capas analizadas también disminuye de la capa externa a la interna, pero al contrario a la resistencia a flexión, disminuye de la cepa a la basa, observándose nuevamente una relación proporcional entre la resistencia y el porcentaje de células de fibras, e inversamente proporcional entre la resistencia y el porcentaje de células de parénquima.

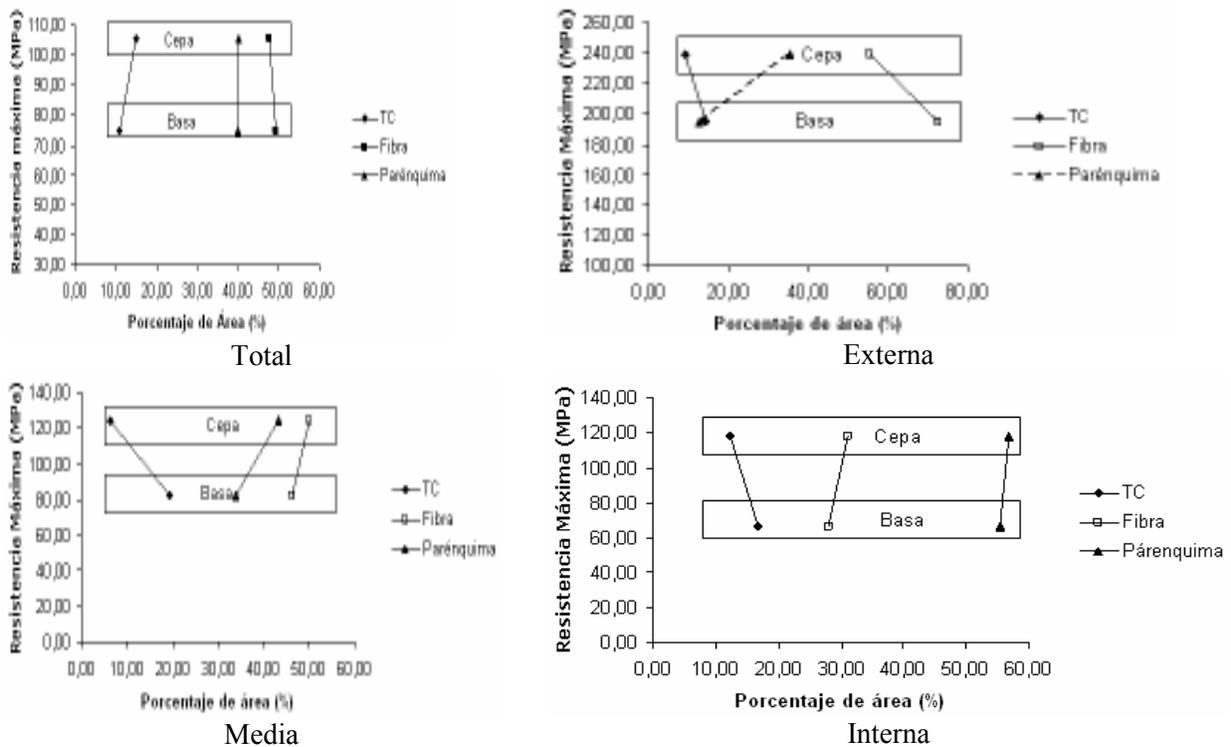


Figura 17. Relación de la resistencia a tensión con la estructura interna de la GAK
Figure 17. Relation of the resistance to tension with the internal structure of the GAK

4. CONCLUSIONES

La distribución de los componentes de la estructura interna tanto en la cepa como en la basa es la siguiente: Las fibras disminuyen de la capa externa a la interna, mientras que las células de parénquima se comportan de manera contraria, y el tejido conductivo se mantiene casi constante a través del espesor total.

Un análisis de varianza y una prueba Duncan con un intervalo de confianza del 95%, mostraron que la resistencia a la flexión se ve afectada por la zona (basa y cepa), por la parte (externa, media e interna), por la presencia de nudos, por la dirección de aplicación de la carga, presentándose diferencias significativas en cada uno de los valores obtenidos bajo la influencia de dichas variables.

La resistencia a la flexión de la Guadua en el espesor total, la capa externa y media, tanto en sentido radial como tangencial, se ve influenciada principalmente de los porcentajes de células de fibra, mientras en la capa interna no se puede afirmar con certeza cual de los constituyentes ejerce mayor incidencia en la resistencia.

Al igual que en la resistencia a flexión, una prueba Duncan con un intervalo de confianza del 95%, mostró que la resistencia a la tensión se ve afectada por la zona, por la parte y por la presencia de nudos, presentándose diferencias significativas en cada uno de los valores obtenidos bajo la influencia de dichas variables.

La resistencia a la tensión de la GAK en el espesor total, la capa externa y media se ve influenciada principalmente por la concentración de células de fibra, mientras en la zona interna no se puede definir con certeza, al igual que en los elementos sometidos a flexión.

El trabajo realizado muestra la incidencia que presenta las células de fibra en la resistencia de la GAK, aspecto que corrobora los resultados

encontrados por otros autores en otros tipos de bambú. Sin embargo, para determinar con certeza la incidencia de cada constituyente (parénquima células de fibra), en la resistencia del material, es necesario adelantar estudios en la GAK analizando cada componente por separado y realizar modelos geométricos y matemáticos, ya que los modelos de ley de mezcla para este tipo de material no han dado buenos resultados (Osorio 2006).

REFERENCIAS

- [1] ABD. LATIF ET AL. 1990. Anatomical features and mechanical properties of three Malaysian bamboos. *Journal Tropical Forest Science* 2(3): 227-234.
- [2] AHMAD MANSUR, A. 2000. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials. Trabajo de grado para optar al título de Doctor of Philosophy in Wood Science and Forest Products. Department of Wood Science and Forest Products. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg. 209 p. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08212000-10440027/unrestricted> (consultada en enero 25 de 2005).
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D-1666. 1975. En: annual book of ASTM standars: designation Philadelphia. p 459-485.
- [4] CHEATLE DAVID; LOPEZ LUIS. 2002. Diseño de Uniones y elementos en estructuras de guadua. Seminario - Taller Avances en la investigación sobre Guadua. Pereira.p 15-32.
- [5] CIRO, H; OSORIO, J; VÉLEZ, J. 2005. Determinación de la resistencia mecánica de la guadua angustifolia kunth a tensión y cizalladura. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* Vol 58 No 1.

- [6] GROSSER, D. & LIESE, W., 1971. On the anatomy of Asian bamboo with special reference to their vascular bundles. *Wood Science and technology*, 5: 290-312.
- [7] HIDALGO OSCAR. 2003. *Bamboo. The gift of the gods*. O. Hidalgo (Ed.) Bogotá, Colombia. 553 p.
- [8] LIESE, W. 1998. The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical report N° 18. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, China. 204 p.
- [9] LO, TOMMY; CUI, H.Z; LEUNG, H.C. 2004. The effect of fiber density on strength capacity of bamboo. *Materials letter*, 58, 2595-2598.
- [10] LONDOÑO, X., RIAÑO, N.M. & CAMAYO, G.C. 2002. Estudio anatómico de los diferentes órganos de la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), con énfasis en el culmo. Corporación regional autónoma del Quindío – Sociedad colombiana del bambú – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – CENICAFE. Chinchiná, Colombia. 38 p.
- [11] SHAFFER, J. et al. 2000. *Ciencia y diseño de materiales en ingeniería*. Primera edición. México, compañía editorial continental.
- [12] THE INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. 1999. Inbar standart for determination of physical and mechanical properties of bamboo. INBAR.
- [13] TONG, J. REN, L.Q; CHEN B.C. 1995. Abrasive wear behavior of bamboo, *Tribology International* 28, 323-327.
- [14] WANG ZHENG GUO WENJING. 2002. *Sympodial Bamboo – chemical composition and fiber characteristics*. Research Institute of Wood Industry 100091. Beijing Chinese. 6p.
- [15] WEGST UGK S. 1993. *Laminated Panel Manufacture of Two Kinds of Bamboo for Architecture Material and Property Comparison*. Research Institute of Wood Industry 100091. Beijing Chinese. 12p