

Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*

Luis Edgar Moreno Montoya*, Lina Rocío Osorio Serna**,
Efraín Eduardo Trujillo De los Ríos***

Resumen

Este estudio abarcó la determinación de las propiedades mecánicas de los haces de fibra de Guadua angustifolia en función de tres factores: edad del culmo, altura del culmo y espesor de pared, con el propósito de evaluar la posibilidad de que dichos haces puedan ser utilizados como fase de refuerzo en materiales compuestos. Utilizando el ensayo de tensión se obtuvieron los siguientes resultados: resistencia a la tensión máxima promedio, 642,58 MPa, módulo de elasticidad promedio, 26,61 GPa, porcentaje de elongación promedio, 2,4. Los haces de fibra que presentaron mayor resistencia a la tensión promedio fueron los intermedios para todas las edades, el mayor módulo de elasticidad promedio se presentó en haces de fibra exteriores de culmos maduros y el menor porcentaje de elongación se presentó en haces de fibra exteriores del culmo.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*, fibras, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, porcentaje de elongación, propiedades específicas.

Abstract

This study included the determination of the mechanical properties of fiber bundles of Guadua angustifolia based on three factors: age of the culm, height of the culm and thickness of the wall, in order to evaluate the possibility that this fiber bundles can be used as reinforcement in composite materials. Using the tensile strength test the following results were obtained: ultimate tensile strength: 642.58 MPa, the Young's modulus 26.61 GPa and elongation 2,4 percent. The fiber bundles that presented the higher resistance to tensile strength were the intermediate fibers bundles for all the ages, the greater E modulus it was presented for fiber bundles of

Fecha de recepción: 30 de mayo de 2005
Fecha de aceptación: 15 de mayo de 2006

*Ingeniero Industrial. Magíster en Física. Profesor Asistente Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. lemorenom@unal.edu.co

** Ingeniera Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

*** Ingeniero Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Dirección: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Departamento de Ingeniería Industrial, carrera 27 N° 64-60, bloque D, 5° piso, Manizales (Colombia).

the outer of mature culms and the smaller elongation it was presented by the outer fiber bundles of the culm.

Key words: *Guadua angustifolia*, fibers, tensile strength, Young's modulus, elongation and specific properties.

INTRODUCCIÓN

La guadua constituye el género de bambú nativo más importante de América tropical, es endémica de este continente, con aproximadamente 30 especies distribuidas desde México hasta Argentina, las cuales se pueden encontrar en un rango de altitud que va desde el nivel del mar hasta los 2.200 m.s.n.m [1]. Es considerada el tercer bambú más grande del mundo, superada únicamente por dos especies asiáticas. La guadua es una gramínea gigante que puede alcanzar 30 metros de altura o más y cuyo diámetro puede variar de uno a 22 centímetros [2].

La *G. angustifolia* es la especie nativa más importante de Colombia. Fue identificada primero por los botánicos Humboldt y Bonpland como *Bambusa guadua*, posteriormente en 1822 el botánico alemán Karl S. Kunth identifica el género *Guadua*, haciendo uso del vocablo indígena "guadua", con el que lo identificaban las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador. Kunth rebautiza la especie con el nombre de *Guadua angustifolia*, que significa "hoja angosta" [3].

Morfológicamente, en una *G. angustifolia* se pueden distinguir las siguientes partes: raíz, tallo, hojas, flores y frutos, sin embargo, es el tallo, y particularmente el culmo, el que tradicionalmente se ha aprovechado para diferentes aplicaciones. El culmo se origina en el ápice del rizoma, y una vez brota del suelo lo hace cubierto de hojas caulinares con el diámetro máximo que tendrá de por vida. Dependiendo de las condiciones climáticas, edáficas y de la época de brotamiento, demora entre 4 a 6 meses para desarrollar su altura definitiva [4]. El culmo de esta especie es un cilindro hueco y adelgazado dividido en segmentos o internodos separados por diafragmas (nodos), que en conjunto con una pared maciza dan al tallo una increíble resistencia mecánica. Los internodos pueden alcanzar diámetros entre 10 y 14 cm y alturas entre 17 y 23 m [2].

En el culmo se distinguen tres tercios: basal, medio y apical, cuyos diámetros promedios son respectivamente: 11.5, 11.05 y 5.84 cm. La sección transversal del culmo presenta tres componentes típicos muy bien diferenciados en cuanto

a la anatomía [5]: la epidermis o corteza exterior, la capa interior de la pared del tallo y el área fibro-vascular, esta última está localizada entre las dos anteriores, y allí aparecen células parenquimáticas que constituyen el tejido del tallo, los haces vasculares como tejido conductivo y las fibras.

Las fibras constituyen el tejido que soporta todo el esfuerzo mecánico al que está sometido el tallo debido al viento y otros factores externos, además de su propio peso. Las fibras del bambú en general se caracterizan por su forma delgada, ahusada en ambos lados y en algunos casos bifurcada en los extremos. Se encuentran en los internodos rodeando a los haces vasculares y constituyen entre el 40 y el 50% del tejido total y entre el 60 - 70% del peso total del culmo [6].

La estructura interna de la fibra es única, posee paredes interiores alternadas en capas gruesas y delgadas con diferente orientación [7] [8]. A esta estructura, que no existe en fibras de madera común, se le denomina estructura polilaminar, y aparece especialmente en las fibras ubicadas en la periferia del culmo y el número de capas alternadas o laminadas varía de fibra a fibra. Esto puede ser atribuible en parte a la ubicación del haz vascular, la posición interna de la fibra y de la madurez del tallo. En general, puede decirse que estas paredes alternadas conducen a que el culmo tenga una excelente resistencia [6].

FASE EXPERIMENTAL

Para obtener las guaduas a partir de las cuales se extrajeron los haces de fibra, se seleccionó un guadual típico de la zona cafetera colombiana (vereda El Guayabal, municipio de Chinchiná, departamento de Caldas), con las siguientes características: altura sobre el nivel del mar de 1.300 m, temperatura promedio anual de 23°C, precipitación promedio anual de 2.200 mm y una humedad relativa del 80%. Utilizando un diseño experimental factorial se seleccionaron 270 haces de fibra obtenidos mecánicamente y con base en tres factores: edad del culmo, altura del culmo y espesor de pared; este último se dividió en zonas muy específicas establecidas con anterioridad por otros investigadores [5]. Cada uno de estos factores se dividió en tres niveles, como se muestra en la tabla 1.

Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se realizó bajo la norma NTC-959 en el Laboratorio de Calidad Textil del SENA Medellín (Colombia), utilizando un dinamómetro

digital Lloyd, el cual mide carga máxima y elongación máxima en el momento de rotura. En el laboratorio se tuvieron las siguientes condiciones controladas: temperatura ambiente, $21^{\circ}\text{C} \pm 1$, humedad relativa, $65\% \pm 2$. Cada haz de fibra fue sometido a una carga de tracción a una velocidad de rompimiento de 80 milímetros por minuto hasta su ruptura total, momento en el cual se mide la carga y deformación máxima. El área de la sección transversal se calculó a partir de la densidad aparente (1.4 g/cm^3), la masa y la longitud de los haces de fibra. Se obtuvo por este medio porque la sección transversal de los haces de fibra de guadua no presenta una geometría regular.

Tabla 1

Matriz de factores y niveles utilizados en los ensayos a tracción de los haces de fibra de *G. angustifolia*

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Edad del culmo	Joven (de uno a tres años)	Maduro (de tres a seis años)	Sobremaduro (seis años en adelante)
Altura del culmo	Primer tercio	Segundo tercio	Tercer tercio
Espesor de pared	Haces de fibra externos (15.2% del espesor del tallo)	Haces de fibras medios (73.9% del espesor del tallo)	Haces de fibras internos (10.8% del espesor del tallo)

El esfuerzo máximo a la tensión de los haces de fibra de *G. angustifolia* se calculó a partir de la ecuación

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde σ es el esfuerzo o resistencia máxima en MPa, P es la carga máxima en N y A es el área en m^2 .

Dado que la gráfica de carga en función de la deformación mostró una tendencia lineal, se asumió que el material presentaba un comportamiento frágil; por lo tanto, para calcular el módulo de elasticidad se utilizó la ecuación

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde E es el módulo de elasticidad en GPa, σ es la fuerza máxima en MPa y ϵ es la deformación unitaria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia a la tensión

En la tabla 2 se presentan los valores promedio de resistencia máxima a la tensión, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación de los haces de fibra de *G. angustifolia* en función de la ubicación y la edad del culmo. No se tuvo en cuenta la resistencia de las fibras en función de la altura del culmo, dado que desde el punto de vista estadístico no se presentaron diferencias significativas.

Tabla 2
Valores promedio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *G. angustifolia* en función de la posición en el culmo y la edad

		Tercio del culmo	Valor promedio resistencia a la tensión (Mpa)	Valor promedio módulo de elasticidad (Gpa)	Valor promedio porcentaje de elongación
Rango de edad	G. joven	Fibras exteriores	534	27,05	2,0
		Fibras intermedias	769	27,44	2,8
		Fibras internas	661	26,24	2,5
	G. madura	Fibras exteriores	578	29,20	2,0
		Fibras intermedias	706	25,67	2,7
		Fibras internas	708	25,61	2,8
	G. sobremadura	Fibras exteriores	512	25,08	2,1
		Fibras intermedias	665	26,77	2,4
		Fibras internas	652	26,40	2,5

La figura 1 muestra valores promedio de resistencia a la tensión de los haces de fibra en función de la edad y de su posición en la pared del culmo. Es evidente que los haces de fibra exteriores, sin importar el rango de edad, son los que presentan menor resistencia a la tensión, incluso con valores por debajo del promedio total del experimento.

Los haces de fibra internos presentaron valores de resistencia superiores al valor promedio, mientras que los haces de fibra intermedios registraron en general el mejor comportamiento. Se puede apreciar que la mayor resistencia a la tensión la presentan los haces de fibra de guaduas jóvenes extraídos de la parte media de la pared. Esta propiedad va disminuyendo a medida que aumenta la edad del tallo.

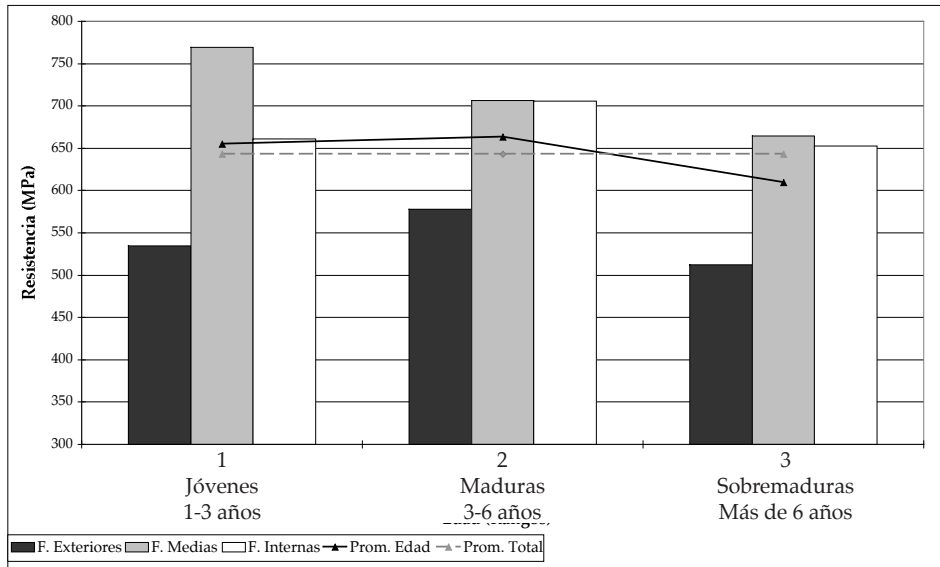


Figura 1. Variación de la resistencia de los haces de fibra de *G. angustifolia* según edad y ubicación en el culmo

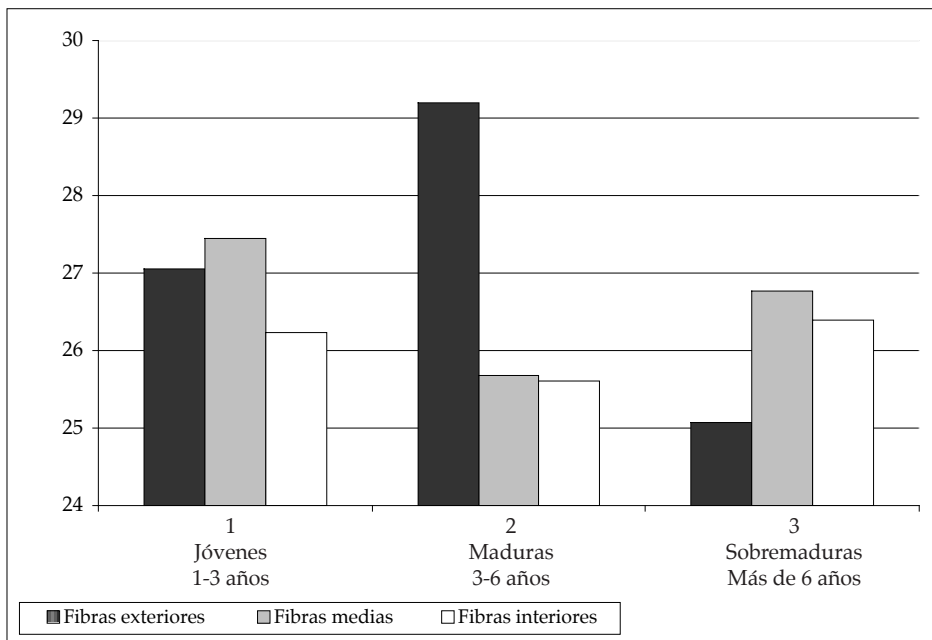


Figura 2. Variación del módulo de elasticidad de los haces de fibra de *G. angustifolia* según edad y ubicación en el culmo

La figura 2 muestra la variación del módulo de elasticidad en función del espesor de pared y la edad del culmo. Como se observa en dicha figura, ninguno de los niveles del factor espesor sigue una tendencia definida en cada una de las edades. Lo haces de fibra exteriores del culmo presentan un valor superior en las guaduas maduras, mientras que presentan los menores valores en las guaduas sobremaduras.

Los haces de fibra internos e intermedios presentan los módulos más altos en las guaduas jóvenes y sobremaduras. Sin embargo, según la prueba de Duncan no hay diferencias significativas entre los niveles de los factores edad y grosor de pared, lo que permite afirmar que se pueden obtener valores de módulo de elasticidad estadísticamente similares de fibras extraídas de cualquier parte de la pared del tallo en cualquier rango de edad de la guadua.

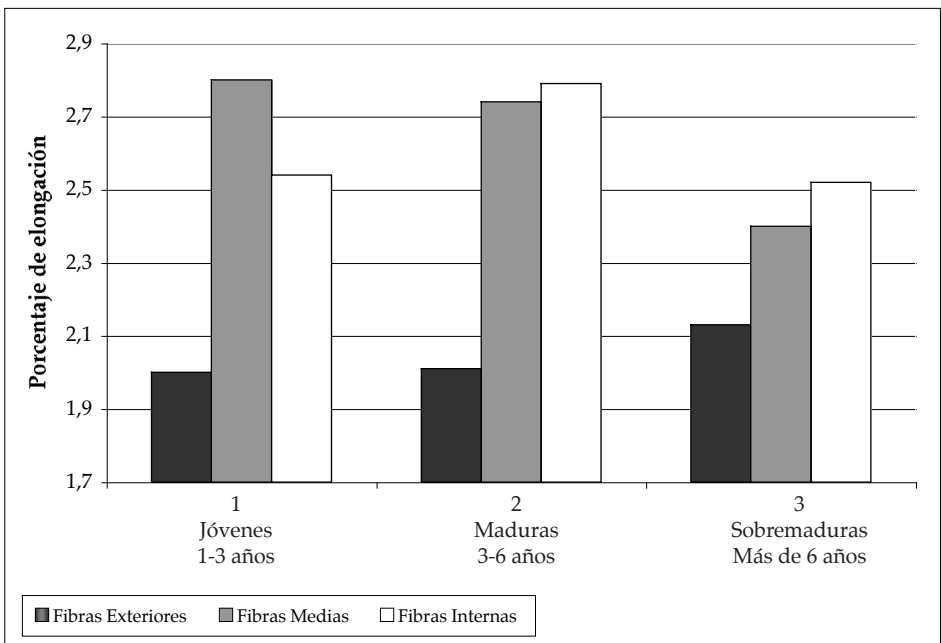


Figura 3. Variación del porcentaje de elongación de los haces de fibra de *G. angustifolia* según edad y ubicación en el culmo

Para los haces de fibra de *G. angustifolia*, el porcentaje de elongación promedio se estableció en 2.4%, la desviación estándar y el coeficiente de variación fueron de 0.73 y 13.5% respectivamente. Este porcentaje demuestra

que se trata de un material poco dúctil, el cual se deforma muy poco antes de fallar. En la figura 3 se observa que los haces de fibras exteriores, que registran en promedio los mayores valores, presentan un comportamiento inverso respecto a los ubicados en la parte intermedia de la pared. Mientras que en los primeros el porcentaje de elongación aumenta levemente con la edad, los segundos muestran una tendencia negativa. En general, el porcentaje de elongación no presentó diferencias significativas para los niveles establecidos.

CONCLUSIONES

Por medio del ensayo de tensión se logró la caracterización de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *G. angustifolia*. Los valores obtenidos, especialmente en la resistencia a la tensión, presentan una apreciable variabilidad, así como los datos recopilados de otras fuentes para otras fibras naturales. Este fenómeno es de esperarse, ya que se trata de un material orgánico cuya resistencia se puede ver afectada por factores tales como: condiciones de crecimiento, proceso de extracción, aspectos climatológicos, entre otros.

Los haces de fibra intermedios presentaron la mayor resistencia a la tensión promedio para los tres rangos de edad, siendo los haces intermedios de guaduas jóvenes los que ofrecen mayor resistencia a la tensión.

Los haces de fibra más rígidos resultaron ser los exteriores de las guaduas maduras, y éstos a su vez, presentaron el menor porcentaje de elongación, lo cual resulta coherente.

El bajo porcentaje de elongación promedio de los haces de fibra demuestra que se trata de un material frágil y, por tanto, sus características se asimilan a las de la mayoría de los materiales de refuerzo para materiales compuestos.

Basados en los resultados de este estudio, el valor de resistencia a la tensión de los haces de fibra de *G. angustifolia* es competitivo con la resistencia de algunas de las principales fibras naturales utilizadas actualmente como refuerzo. En teoría, este material se vislumbra como una excelente alternativa para sustituir fibras naturales y aun sintéticas en aplicaciones en las cuales criterios como el costo, reciclabilidad, peso y resistencia específica son relevantes.

REFERENCIAS

- [1] LONDOÑO, X. A decade of observations of a *Guadua angustifolia* plantations in Colombia. En: *The Journal of the American Bamboo Society*, 1998, Vol. 12 (1), p. 37-42.
- [2] HIDALGO, O. *Bamboo. The gift of the gods*. Bogotá. Editado por Oscar Hidalgo López, 2003. 553 P.
- [3] LONDOÑO, X. La *Guadua* un bambú importante de América. En *Memorias primer Seminario Bamboo 2001*, Guayaquil, Ecuador, 8-10 de agosto.
- [4] ARBELÁEZ, A. La estructura morfológica del culmo de la *Guadua Angustifolia* Kunth. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrícolas, 1998, p. 3-18.
- [5] LONDOÑO, X., CAMAYO, G., RIAÑO, N. y LÓPEZ, Y. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. En *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, 2002, Vol. 16 (1), p. 18-31.
- [6] LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. En *Bamboo Workshop Hangzhou*, octubre de 1985, p. 196-207.
- [7] TONO, T. y ONO, K., The layered structure and its morphological transformation by acid treatment. En *Journal of Japanese Wood Research Society*, 1962, 8, p. 245- 249. Citado por Liese, W., 1998. The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical Report No 18. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, p. 66.
- [8] PARASMEWARAN, N. y LIESE, W. On the fine structure of bambú fibres. En: *Wood Science and Technology*, 1976, 10, p. 231-246. Citado por Liese, W., 1998. The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical Report N° 18. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, p. 66.