

Ingeniería y Universidad
Pontificia Universidad Javeriana
reving@javeriana.edu.co
ISSN (Versión impresa): 0123-2126
COLOMBIA

2007

Caori Patricia Takeuchi Tam / César Emilio González
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LA GUADUA
ANGUSTIFOLIA Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD
Ingeniería y Universidad, enero-junio, año/vol. 11, número 001
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia
pp. 89-103

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Universidad Autónoma del Estado de México

<http://redalyc.uaemex.mx>



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DE LA *GUADUA ANGUSTIFOLIA* Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD*

PARALLEL COMPRESSION RESISTANCE OF BAMBOO FIBER *ANGUSTIFOLIA* AND DETERMINATION OF THE ELASTICITY MODULE

Caori Patricia Takeuchi Tam**

César Emilio González***

Resumen: el capítulo E-7 de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente contempla el diseño de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado. Sin embargo, actualmente se utiliza guadua rolliza como material de construcción en elementos de armaduras y pórticos para estructuras de cubiertas, puentes y edificaciones sin que haya una norma de diseño que contemple la guadua como material estructural. Para contar con valores de diseño, el grupo de investigación Análisis, Diseño y Materiales, GIES, de la Universidad Nacional de Colombia, ha realizado estudios para la determinación de la resistencia a corte paralela a la fibra y tensión perpendicular a la fibra. Como continuación de dichos estudios, en el año 2006 se encontraron estas propiedades mecánicas a partir de ensayos con *Guadua angustifolia* proveniente de los departamentos de Quindío y Caldas. En este artículo se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la compresión paralela a la fibra, el esfuerzo admisible para el diseño de elementos a compresión bajo diferentes combinaciones de carga y del módulo de elasticidad para la *Guadua angustifolia*.

* Fecha de recepción: 15 de febrero de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 20 de abril de 2007. Este artículo se desprende del proyecto de investigación con el mismo nombre financiado por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.

** Ingeniero Civil y Máster en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: cptakeuchit@unal.edu.co

*** Ingeniero Civil, Especialista en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero independiente. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ces_gonz@hotmail.com

Palabras clave: bambú en la construcción, resistencia de materiales, bambú en la construcción, ensayo de compresión de materiales.

Abstract: the chapter E-7 of the Colombian Seismic Design and Construction Code contemplates the construction of one or two floors houses using guadua or wood covered by cement mortar. However, the guadua is used as construction material in elements of trusses and frames for structures of roofs, bridges and buildings and there is not a design code that contemplates the guadua as structural material. In order to have design values in this matter, the research group GIES of the Universidad Nacional de Colombia, has carried out studies about shear strength parallel to the fiber and tension strength perpendicular to the fiber. As continuation of those studies in the year 2006 those mechanical properties were determined conducting a wide number of tests with *Guadua angustifolia* from the Colombian departments of Quindío and Caldas. In this paper the results obtained in those test referred to the compression strength parallel to the fiber, the allowable value for compression strength under different load combinations and the elasticity module for the *Guadua angustifolia* are presented.

Key words: bamboo construction, strength of materials, bamboo construction, compression testing.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia se ha determinado la resistencia a la compresión paralela a la fibra en guadua en trabajos de distintos autores (Carvajal, 1981; García, 1991; González, 1992; Hidalgo, 1978; Martín, 1981; Mejía, 1985; Merino, 1972; Salazar, 1983). Sin embargo, los valores obtenidos no pueden ser comparados y analizados estadísticamente por diferentes razones. La primera de ellas porque debido a la falta de una norma para el ensayo a compresión en guadua, las investigaciones anteriormente mencionadas utilizaron procedimientos diferentes; la segunda, debido a que las edades de ensayo variaron entre un año y siete años; adicionalmente, en muchos de estos trabajos, el número de ensayos fue muy reducido.

En el ámbito internacional son conocidos los trabajos de Janssen y Ghavami. Janssen ensayó probetas de bambú a compresión –especie *Bambusa blumeana*–. El bambú de tres años de edad fue transportado desde Filipinas hasta Holanda. Las probetas ensayadas tenían diferentes alturas, algunas tenían nudo y otras no, y fueron extraídas de diferentes partes del culmo o tallo. Se ensayaron 106 probetas cortadas de tres culmos (Janssen, 1999). Ghavami y Marinhno presentan las diversas propiedades de diferentes especies de bambú *Moso mataka*, *Guadua angustifolia*, *Guadua tagoara* y *Dendrocalamus giganteus*, y encontraron que la resistencia a compresión fue en general tres veces menor que la resistencia a tracción (Ghavami, 2001).

Gracias al impulso del Internacional Network on Bamboo and Rattan (INBAR) a los procedimientos de ensayo para la determinación de las

propiedades mecánicas del bambú (Janssen, 1999) se formuló la norma técnica actualmente utilizada ISO 22157 (Internacional Estándar, 2004) que se ha convertido en el protocolo del ensayo a compresión paralela a la fibra desde entonces.

De acuerdo con el procedimiento descrito en la norma, se determinó la resistencia a compresión paralela a la fibra en *Guadua angustifolia* en Colombia en varios estudios y con un alcance diferente de cada uno de los ensayos así: cuarenta y cinco probetas (Uribe, 2002), con trece probetas (Prada, 2003), con veintitrés probetas (Castrillón, 2004) y con cuatro probetas (Parotti, 2006).

De forma similar, para la determinación del módulo de elasticidad se ha recurrido a diferentes procedimientos. Por ejemplo, en algunos trabajos se determinó el módulo de elasticidad en ensayos de compresión paralela a las fibras (Prada, 2003; Uribe, 2002). Sin embargo, los valores encontrados en estos estudios no son confiables debido a que se calculó el acortamiento de la probeta a partir de la distancia entre los platos de carga. En otros trabajos se determinó el módulo de elasticidad en ensayos de compresión, pero utilizando extensómetros (Ghavami, 2001; Parotti, 2006). Sánchez y Prieto (2002) encontraron el módulo de elasticidad mediante el cálculo de la deflexión de vigas simplemente apoyadas, mientras Torres (2005) determinó este valor a partir de la deflexión de vigas en voladizo, y Camacho y Páez (2002) lo hacen a partir de deflexiones de ensayos en probetas columna-viga. Méndez y Vallecilla (2003) encontraron el módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* usando un ensayo de propagación de onda.

La norma ISO 22157 contempla un protocolo de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad en ensayos de compresión directa. Sin embargo, en dicha norma se establece que para cada ensayo se deben utilizar por lo menos dos deformímetros eléctricos (Internacional Estándar, 2004).

Dado el procedimiento de ensayo establecido por la norma para la determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra, en la Universidad Nacional de Colombia se desarrolló un estudio con un número alto de ensayos de guadua proveniente de dos regiones del país, con el objetivo de determinar un valor representativo y proponer valores de esfuerzos admisibles. Sin embargo, a pesar de las condiciones de realización del ensayo previstas en la norma que harían muy costoso el ensayo, se decidió utilizar para la determinación del módulo de elasticidad deformímetros mecánicos en lugar de los eléctricos y, en algunos ensayos, se tomaron lecturas de deformación tanto con deformímetros mecánicos como eléctricos.

2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Los pasos para la realización de los ensayos a compresión paralela a la fibra se relacionan a continuación:

- a. Preparación de las muestras. Las probetas de ensayos se elaboraron con culmos de *Guadua angustifolia* variedad macana de edades mayores a cinco años procedente de cuatro guaduales de diferentes veredas de los departamentos de Quindío y Caldas (Tabla 1).

Tabla 1. Localización de la toma de muestras

Finca	Municipio	Departamento	Vereda	Altitud
Bambusal	Montenegro	Quindío	La Esmeralda	1250 m
Nápoles	Montenegro	Quindío	Calle Larga	1227 m
Los Ángeles	Montenegro	Quindío	Guatemala	1232 m
Playa Rica	Manizales	Caldas	Las Pavas	1235 m

Fuente: presentación propia de los autores.

En cada guadual se realizó el procedimiento descrito en el documento ISO N315 que consiste en la identificación del guadual, la selección del culmo para corte, la medición y demarcación del nudo próximo localizado a un metro a partir del rizoma, el corte con machete por encima del nudo, el corte del culmo en partes iguales para facilidad en el transporte y la numeración de culmos (ISO N315, 1999).

Posteriormente se transportó la guadua hasta el sitio de corte de probetas para luego llevarla al Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia. Las guaduas se secaron de forma natural al medio ambiente. En la Tabla 2 se muestra el número de probetas según el lugar de procedencia.

Tabla 2. Número de probetas según lugar de procedencia

Finca	Número de probetas
Bambusal	222
Nápoles	225
Los Ángeles	160
Playa Rica	202
Total	809

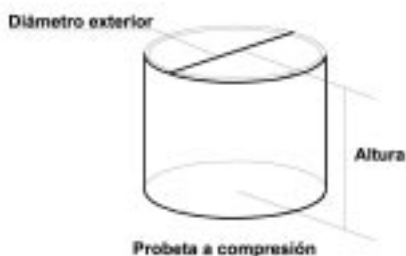
Fuente: presentación propia de los autores.

- b. Procedimiento de ensayo. Los ensayos de masa por volumen, contenido de humedad, compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad utilizando deformímetros eléctricos, se realizaron siguiendo básicamente, los procedimientos descritos en las normas ISO 22157 (Internacional Estándar, 2004) e ISO N315 (ISO N315, 1999).

De acuerdo con dichas normas se deben extraer probetas de la parte superior, media e inferior de cada tallo a ensayar. El corte debe ser plano y perpendicular al eje de la probeta con una desviación máxima de 0.2 mm. Las probetas deben tener una altura igual a su diámetro exterior si esta medida es mayor a 20 mm o, en caso

contrario, debe ser igual a dos veces el diámetro (Figura 1a). Para determinar el módulo de elasticidad se deben colocar dos deformímetros eléctricos en cada probeta, como se observa en la figura 1b.

Figura 1. Probeta a compresión con deformímetro eléctrico instalado.



a.



b.

Fuente: presentación propia de los autores.

Con los datos de esfuerzo, calculado con la carga y el área de la probeta, y de deformación se construye el gráfico esfuerzo-deformación. El módulo de elasticidad es la pendiente de la recta que une los puntos que corresponden al 20% y 80% del esfuerzo último.

Para la determinación del módulo de elasticidad en 479 probetas se siguió el procedimiento previsto en las normas, excepto por la utilización de un deformímetro mecánico para medir la deformación longitudinal instalado en anillos de soporte en lugar de los deformímetros eléctricos (Figura 2).

Figura 2. Probeta a compresión con deformímetro mecánico instalado.



Fuente: Castrillón (2004)

Las probetas para el ensayo de compresión tenían una altura igual a dos veces el diámetro exterior con el fin de permitir la colocación de los anillos para los deformímetros mecánicos.

- c. Equipo utilizado. Para pesar las muestras se utilizó una balanza digital con exactitud de 0.01 g. Para el ensayo de humedad se empleó un horno con control electrónico de temperatura y para el ensayo a compresión una prensa marca Servintegral Ltda. con capacidad de carga de 200 toneladas.

Las lecturas de deformación se tomaron con deformímetros mecánicos cuyo indicador tenía un rango de 0.2" (5.08mm) y graduaciones mínimas de 0.0001 (0.0025mm) y deformímetros eléctricos unidireccionales marca Kyowa.

- d. Desarrollo de los ensayos. Se observó durante los ensayos que la preparación de las muestras debe ser muy cuidadosa. El corte de las probetas debe ser totalmente recto para que la carga sea aplicada uniformemente; al utilizar inicialmente una acolilladora con un disco menor al diámetro de la probeta fue necesario hacer en cada extremo dos cortes, los cuales no siempre dejaban el extremo totalmente plano. Este inconveniente se solucionó al realizar los cortes con una sierra sin fin.

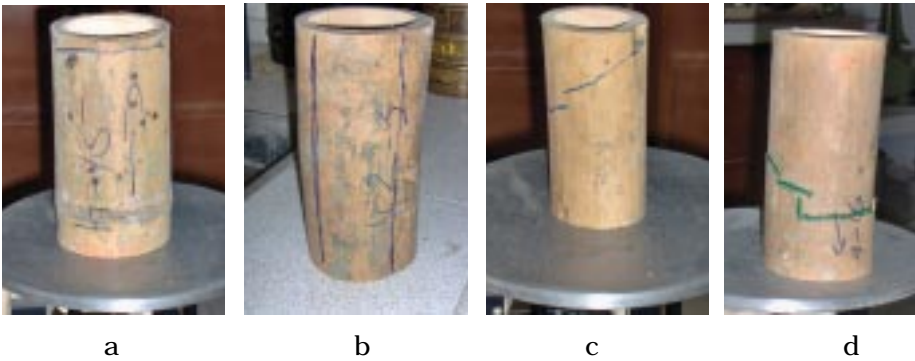
Los cortes de los extremos debían ser perpendiculares al eje de la probeta para lograr que la carga aplicada fuera paralela a la fibra. En algunas muestras esto no fue posible por la curvatura natural del culmo.

Para la aplicación de la carga no hubo mayores inconvenientes. En cambio para la colocación de los deformímetros mecánicos sí, lo cual pudo afectar algunas lecturas. A diferencia de los cilindros de concreto, la guadua no tiene una sección constante, ya que disminuye el diámetro en altura o no es totalmente recta, por lo cual en algunos ensayos pudo ocurrir que los anillos de soporte no quedarán totalmente horizontales. Es importante verificar antes de empezar el ensayo que estos se encuentren en la posición correcta. En algunas ocasiones, los anillos de soporte no pudieron ser colocados a una distancia adecuada de los platos de carga.

Al utilizar deformímetros eléctricos fue posible tomar lecturas de deformación hasta la falla, logrando obtener así el diagrama completo de esfuerzo-deformación en la mayoría de los casos. Al emplear deformímetros mecánicos fue necesario retirarlos antes de la falla para prevenir su daño, razón por la cual no fue posible tomar las últimas lecturas de deformación. Sin embargo, se debe considerar que el módulo de elasticidad se obtiene en el rango elástico.

- e. Descripción de las fallas. Al llegar a la carga de falla, las probetas fallaron por aplastamiento (Figura 3a), por tensión perpendicular a la fibra con la presencia de fisuras paralelas a la fibra (Figura 3b), por corte con la presencia de fisuras diagonales (Figura 3c) o por diversas combinaciones de las anteriores (Figura 3d).

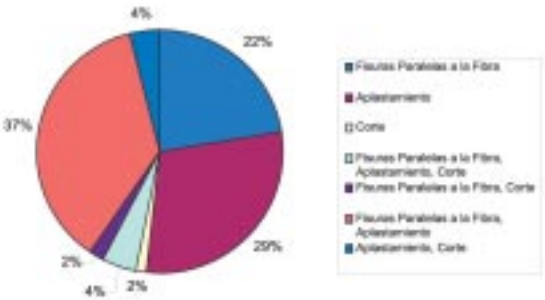
Figura 3. Formas de falla presentadas en el ensayo.



Fuente: presentación propia de los autores.

En la Figura 4 se observa el porcentaje de fallas de cada tipo en el total de probetas ensayadas.

Figura 4. Porcentaje de fallas de cada tipo en el total de probetas ensayadas



Fuente: presentación propia de los autores.

3. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para encontrar los valores de resistencia última y de esfuerzos admisibles, así como para evaluar los resultados, se calculó la media y la desviación estándar y el valor correspondiente al límite de exclusión del 5%.

Posteriormente, se calculó el valor característico de la norma ISO 22156 (Internacional Estándar, ISO 22156-1, 2004), según la Ecuación 1.

$$\sigma_k = \sigma_{0.05} \left(1 - \frac{2.7 \frac{s}{m}}{\sqrt{n}} \right) \quad (1)$$

Donde:

- σ_k : valor característico (MPa)
- $\sigma_{0.05}$: percentil 5 de los datos de ensayo (MPa)
- m : esfuerzo medio de la muestra (MPa)
- s : desviación estándar de la muestra (MPa)
- n : número de ensayos (mayor a 10)

Para encontrar los valores de esfuerzo admisibles calculados con la Ecuación 2 (Internacional Estándar, ISO 22156-1, 2004) se utilizaron los coeficientes de duración de la carga (D), de modificación por la diferencia entre la calidad en el laboratorio y en la práctica real (G) y el factor de seguridad predeterminados por la norma.

$$\sigma_{adm} = \sigma_k \cdot G \cdot D / S \quad (2)$$

Donde:

- σ_{adm} : esfuerzo admisible (MPa)
- σ_k : valor característico (MPa)
- G : modificación para tener en cuenta la diferencia entre la calidad de laboratorio y la práctica: Valor predeterminado 0.5.
- D : valor de modificación para la duración de la carga: carga permanente (- 1.0), carga permanente más carga viva (- 1.25), carga anterior más carga del viento (- 1.5)
- S : factor de seguridad, predeterminado como 2.25

3.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En la Tabla 3 se observan los resultados obtenidos de resistencia a compresión paralela a la fibra según la procedencia. El valor de resistencia a la compresión mínimo fue de 29 MPa y el máximo de 119 MPa. Se encuentran como valores de esfuerzo admisible 9 MPa para análisis con carga muerta, 11 MPa para análisis con carga muerta y viva, y 13 MPa para análisis con carga muerta, viva y viento.

Tabla 3. Resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* para diferentes procedencias (MPa)

Parámetro	Finca				
	El Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	222	225	160	202	809
$\sigma_{\text{Mínimo}}$	29.45	34.00	30.11	33.86	29.45
$\sigma_{\text{Máximo}}$	82.23	92.27	81.74	118.79	118.79
σ_{Promedio}	58.52	59.43	56.29	51.57	56.21
Desviación Estándar	10.89	8.63	10.40	8.63	10.16
σ_k	37.76	44.42	39.14	39.86	40.42
σ_{adm} (Carga muerta)	8.39	9.87	8.70	8.86	8.98
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva)	10.49	12.34	10.87	11.07	11.23
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva + viento)	12.59	14.81	13.05	13.29	13.47

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 4 se observan los valores encontrados de resistencia a compresión paralela a la fibra según la localización en el culmo de las probetas: cepas (parte inferior), basas (parte intermedia) y sobrebasas (parte superior estructural). En general podría decirse que el esfuerzo máximo a compresión aumenta con la altura, dado que se obtuvieron mayores valores para las sobrebasas y menores valores para las cepas.

Tabla 4. Resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* para sobrebasas, basas y cepas (MPa)

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
σ_{Promedio}	50.63	56.42	59.70	56.21
Desviación estándar	9.03	9.35	10.21	10.16
σ_k	35.38	42.61	43.35	40.42
σ_{adm} (Carga muerta)	7.86	9.47	9.63	8.98
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva)	9.83	11.84	12.04	11.23
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva + viento)	11.79	14.21	14.45	13.47

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 5 se muestra la influencia que tiene la presencia de fisuras que se presentaron durante el secado de las guaduas al medio ambiente. En general los resultados obtenidos indican que la resistencia a compresión no varía cuando se presentan fisuras durante el secado de la guadua al medio ambiente.

Tabla 5. Influencia por fisuras durante el secado en la resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* para sobrebasas, basas y cepas (MPa)

Parámetro	Localización en el culmo							
	Cepas		Basas		Sobrebasas		Total	
	Con fisuras	Sin fisuras	Con fisuras	Sin fisuras	Con fisuras	Sin fisuras	Con fisuras	Sin fisuras
Número de muestras	51	139	97	239	44	239	192	617
$\sigma_{\text{Mínimo}}$	30.91	29.45	31.68	33.03	44.43	36.31	30.91	29.45
$\sigma_{\text{Máximo}}$	70.69	92.60	82.23	79.78	73.71	118.79	82.23	118.79
σ_{Promedio}	50.95	50.51	56.75	56.26	59.72	59.70	55.89	56.31
Desviación estándar	9.40	8.92	11.22	8.50	8.48	10.51	10.63	10.02
σ_{ult}	34.91	35.19	39.27	43.33	43.74	42.46	39.60	40.35
σ_{adm} (Carga muerta)	7.76	7.82	8.73	9.63	9.72	9.44	8.80	8.97
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva)	9.70	9.76	10.91	12.04	12.15	11.80	11.00	11.21
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva + viento)	11.64	11.73	13.09	14.44	14.58	14.15	13.20	13.45

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 6 se muestra la diferencia de resultados entre probetas con nudos y sin nudos según la posición de las probetas en el culmo. Según los resultados obtenidos, la presencia de nudos no aumenta la resistencia a compresión paralela a la fibra.

Tabla 6. Influencia por la presencia de nudos en la resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* para sobrebasas, basas y cepas (MPa)

Parámetro	Localización en el culmo							
	Cepas		Basas		Sobrebasas		Total	
	Con nudo	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo	Con nudo	Sin nudo
Número de muestras	135	55	154	182	82	201	371	438
$\sigma_{\text{Mínimo}}$	29.45	33.14	34.42	31.68	38.74	36.31	29.45	31.68
$\sigma_{\text{Máximo}}$	70.69	92.60	78.03	82.23	118.79	81.74	118.79	92.60
σ_{Promedio}	50.11	51.89	56.02	56.75	58.12	60.35	54.34	57.79
Desviación Estándar	8.64	9.88	9.12	9.56	12.38	9.13	10.29	9.79
$\sigma_{\text{últ}}$	35.10	35.20	42.69	41.95	40.73	44.63	39.60	41.81
σ_{adm} (Carga muerta)	7.80	7.82	9.49	9.32	9.05	9.92	8.80	9.29
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva)	9.75	9.78	11.86	11.65	11.31	12.40	11.00	11.62
σ_{adm} (Carga muerta + Carga viva + viento)	11.70	11.73	14.23	13.98	13.58	14.88	13.20	13.94

Fuente: presentación propia de los autores.

3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

En la Tabla 7 se observan los resultados de módulo de elasticidad según el lugar de procedencia de las muestras, mientras en la Tabla 8 aparecen dichos resultados en función de la posición en la altura del culmo.

Tabla 7. Módulo de elasticidad (mínimo, máximo y promedio) de la *Guadua angustifolia* para diferentes procedencias (MPa)

Parámetro	Finca				
	El Bambusal	Nápoles	Los Ángeles	Playa Rica	Total
Número de muestras	146	118	88	127	479
$E_{\text{Mínimo}}$	9,434	9,517	4,242	6,878	4,242
$E_{\text{Máximo}}$	33,479	27,556	49,551	146,336	146,336
E_{Promedio}	19,519	18,532	15,531	16,662	17,859
Desviación estándar	4,163	3,216	5,679	12,425	7,528

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 8. Módulo de elasticidad (mínimo, máximo y promedio) de la *Guadua angustifolia* para sobrebasas, basas y cepas (MPa)

Parámetro	Localización en el culmo			Total
	Cepas	Basas	Sobrebasas	
Número de muestras	150	267	62	479
E _{Mínimo}	4,242	6,570	10,327	4,242
E _{Máximo}	146,336	33,479	40,637	146,336
E _{Promedio}	17,418	18,130	17,757	17,859
Desviación estándar	11,929	4,187	4,377	7,527

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de módulo de elasticidad encontrados al utilizar deformímetros eléctricos y mecánicos. El valor promedio del módulo de elasticidad encontrado con el uso de deformímetros eléctricos fue un 11% mayor al encontrado con el uso de deformímetros mecánicos.

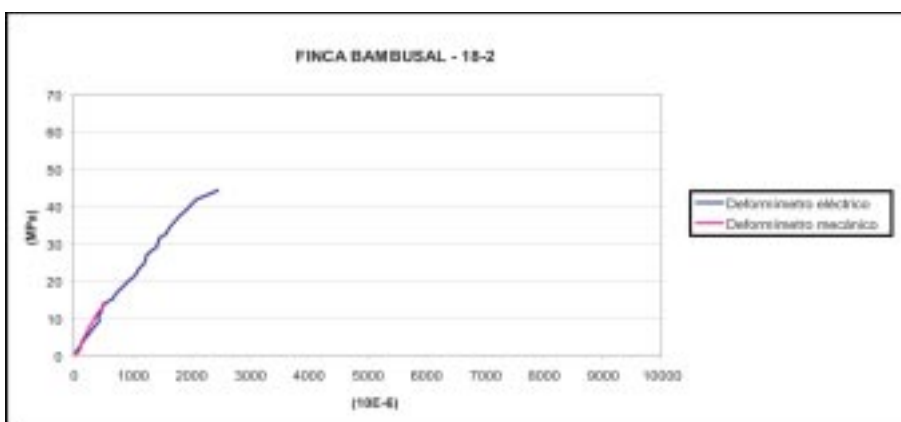
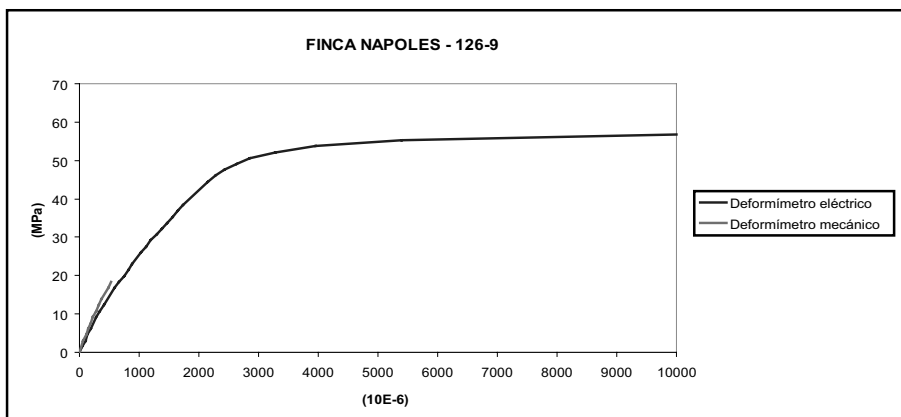
Tabla 9. Módulo de elasticidad (mínimo, máximo y promedio) de la *Guadua angustifolia* lecturas para deformímetros mecánicos y eléctricos (Mpa)

Parámetro	Total	
	Deformímetro mecánico	Deformímetro eléctrico
Número de muestras	479	20
E _{Mínimo}	4,242	8,220
E _{Máximo}	146,336	37,839
E _{Promedio}	17,859	20,022
Desviación estándar	7,527	8,381

Fuente: presentación propia de los autores.

En el Gráfico 1 se presentan los diagramas de esfuerzo-deformación de dos de las probetas ensayadas, en donde se utilizaron simultáneamente deformímetros eléctricos y mecánicos. Se encontró que la mayoría de las gráficas esfuerzo-deformación tenía un primer tramo recto y un segundo tramo curvo. Para muchos casos, cuando el esfuerzo era el 80% del esfuerzo último, ya la probeta no estaba en la parte recta inicial.

Gráfico 1. Diagramas esfuerzo deformación en dos probetas ensayadas a compresión paralela a la fibra. Procedencia Finca Nápoles.



Fuente: presentación propia de los autores.

En sólo el 15% de los casos –para tres especímenes–, el módulo de elasticidad encontrado al utilizar deformímetros mecánicos en lugar de los eléctricos fue mayor.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- La resistencia promedio a compresión paralela a la fibra aumentó con la altura.
- El valor promedio de resistencia a compresión paralela a la fibra fue de 56 MPa.
- La presencia de fisuras presentadas por secado al medio ambiente no disminuyó la resistencia a compresión.
- No se encontró que la resistencia de probetas con nudos fuera mayor a la resistencia de probetas sin nudos.

- El valor promedio del módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* ensayada fue de 17859 MPa.
- El valor promedio del módulo de elasticidad calculado con los acortamientos medidos con deformímetros eléctricos fue un 11% mayor que al medir los acortamientos con deformímetros mecánicos.
- En el 50% de los casos las lecturas de deformación tomadas con deformímetros eléctricos y mecánicos fue similar. En el 85% de los datos el valor del módulo de elasticidad encontrado utilizando deformímetros mecánicos fue menor que al utilizar deformímetros eléctricos.

Así mismo se emiten las siguientes recomendaciones como resultado del estudio:

- Se recomienda utilizar un valor de esfuerzo admisible de 11 MPa para cargas gravitacionales (carga muerta y carga viva) y de 13 MPa cuando se incluye el viento en el análisis (carga muerta, carga viva y viento).
- Teniendo en cuenta el alto costo de los deformímetros eléctricos y que se deben hacer por lo menos diez ensayos, se podría aceptar el uso de deformímetros mecánicos para determinar el módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* teniendo especial cuidado en la colocación de los anillos de soporte.
- Si se considera que la guadua es un recurso autóctono y renovable, cuyo uso produce poco daño ambiental, se podría utilizar como material estructural. Los resultados de este trabajo complementados con otros trabajos similares en otros institutos de investigación con guadua de otras regiones podrían hacer parte de una norma técnica.
- De la misma manera se recomienda realizar trabajos similares para determinar los esfuerzos admisibles para otros tipos de sollicitación como son tensión paralela a la fibra y flexión.

REFERENCIAS

- CAMACHO, V y PÁEZ, I. *Estudio de conexiones en guadua, solicitadas a momento flector*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- CARVAJAL, W., ORTEGON, W. y ROMERO, C. J. *Elementos estructurales en bambú*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 1981.
- CASTRILLÓN, B. y MALAVER, D. *Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- GARCÍA, O. L., MARTÍNEZ, C. y DIXON, E. Puentes en do mayor. *Publicado en Memorias I Congreso Mundial del Bambú*. Armenia, Colombia: Universidad del Quindío, 1991.

- GHAVAMI, K. y MARINHO, A. B. *Determinação das propriedades dos bambus das espécies: Mosó, Matake, Guadua angustifolia, Guadua tagoara e Dendrocalamus giganteus para utilização na engenharia*. Rio de Janeiro: RMNC do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2001.
- GONZÁLEZ, C. E. *Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- GONZÁLEZ, E y DÍAZ, J. F. *Propiedades físicas y mecánicas de la Guadua (Guadua Angustifolia Kunth)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1992.
- HIDALGO, O. *Nuevas técnicas de construcción con bambú y concreto reforzado con cables de bambú*. Bogotá: CIBAM, Universidad Nacional de Colombia, 1978.
- INTERNACIONAL ESTÁNDAR. ISO 22156-1. *Bamboo Structural Design*. 1st ed. Switzerland, 2004.
- INTERNACIONAL ESTÁNDAR. ISO 22157-1. *Bamboo. Determination of physical and mechanical properties*. 1st ed. Switzerland, 2004-06-01.
- INTERNACIONAL ESTÁNDAR. ISO N315. Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo. Working document. ISO, 1999.
- JANSSEN, J. J. *Laboratory Manual On Testing Methods For Determination Of Physical And Mechanical Properties Of Bamboo On behalf of INBAR The International Network on Bamboo and Rattan*. 3rd draft. January 1999.