

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LA GUADUA *Agustifolia kunt* A ESCALA NATURAL

Eugenia González C.¹; Jairo A. Osorio S.²; Eduard A. García G³.

RESUMEN

*En los laboratorios de productos forestales y en el de construcciones rurales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, se realizaron dieciocho (18) ensayos de flexión estática a escala natural con luces entre 2,50 y 3,50 metros de la sobrecarga del elemento, las cuales son las más utilizadas y recomendadas para este tipo de esfuerzo, donde el material seleccionado corresponde a la especie Guadua (*Angustifolia kunth*), colectada en la Finca Cotové ubicada en Santafé de Antioquia y cuya zona de vida corresponde a un bosque seco tropical (bs-t).*

Las pruebas fueron realizadas basadas en las Normas COPANT 455 (1972) para selección y colección de muestras de madera, 459 acondicionamiento de maderas destinadas a ensayos físicos y mecánicos y 460 para la determinación del contenido de humedad y las normas de la American Society for Testing and Materials, 1975. Estas normas son empleadas para maderas macizas, por lo tanto debieron ser ajustadas a las condiciones particulares de la guadua circular hueca de acuerdo a la metodología utilizada por González y Díaz 1992.

Este trabajo presenta los resultados de las ecuaciones de diseños para elementos de guadua sometidos a flexión estática, los valores de esfuerzos unitarios en el límite proporcional (RLP), módulo de elasticidad (MOE) y el esfuerzo de rotura (MOR), los cuales fueron comparados con los valores obtenidos por González y Díaz, 1.992, cuyos ensayos fueron hechos bajo probetas, obteniéndose variaciones menores del 7% entre estos, y a la vez se hallaron unos coeficientes de varianza con rangos entre el 20 y el 30% para los parámetros establecidos los cuales fueron considerados aceptables.

¹ Ingeniera Agrícola, M.Sc. Especialista en Gerencia del Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Apartado Aéreo 1779 Medellín.

² Ingeniero Agrícola, Especialista en Cuencas Hidrográficas. Egresado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Apartado Aéreo 1779 Medellín.

³ Ingeniero Agrícola. Egresado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Apartado Aéreo 1779 Medellín.

Para la obtención de los parámetros anteriores se tuvieron en cuenta aspectos como la longitud, diámetro promedio, espesor de las paredes medidas en los extremos, el contenido de humedad en base seca y la carga de falla del elemento.

Finalmente, se recomienda utilizar las ecuaciones de diseño obtenida con elementos cuyos parámetros se encuentren entre los siguientes rangos, con el fin de garantizar un mayor factor de seguridad a la hora de aplicar dichas ecuaciones, ya que estos son considerados de gran importancia al momento de realizar cálculos estructurales con este tipo de material alternativo de construcción: longitud 2,50 -3,00 m; espesor de las paredes 0,70-1,40 cm; humedad en base seca 7,0 - 11,5 %; diámetro promedio 8,0 - 12,0 cm.

Palabras claves: Guadua, Resistencia a la flexión, Factores de diseño.

ABSTRACT

Resistance to the flexion of the guadua *Agustifolia kunt* to natural scale

At the Forest Products and at the rural construction laboratories of the Universidad Nacional de Colombia - Medellín, eighteen (18) tests of static flexion to natural scale with lights between 2.50 and 3.50 meters of the sobrebase of the element were carried out, which are used and recommended for this type of stress, where the selected material corresponds to the Guadua (*Agustifolia kunth*) species, collected in the Cotové farm located in Santafé de Antioquia and whose zone of life corresponds to a tropical dry forest (T-df). The tests were carried out based on COPANT 455 Norms (1972) for selection and collection of wood samples, 459 wood preparation destined to physical and mechanical tests and the 460 for the determination of the humidity content and norms of the American Society for Testing and Materials, 1.975. These norms are used for solid wood, therefore they had to be fit to the particular conditions of guadua to circulate hollow according to the methodology used by González and Díaz, 1992.

This work presents the results of the equations of designs for elements of guadua subjected to static flexion, the values of unitary stress in limits proportional (RLP), module of elasticity (MOE) and the breaking strenght (MOR), which was compared with the values obtained by Diaz and González, 1992, whose tests were done under test tubes, obtaining smaller variations of 7% between these, and simultaneously were coefficients of variance with ranks between the 20 and 30% for the established parameters which were considered acceptable. Aspects like length, diameter average, thickness of the walls measured in the ends, the humidity content in dry base and the load of flaw of the element were considered to obtain the previous parameters. Finally, it is recommended to use the equations of design obtained with elements whose parameters are between the following ranks, with the purpose of guaranteeing a greater factor of safety when applying this equations, since these are considered of great importance to the moment of make structural calculations with this type of alternative material of construction: Length: 2,50 -3,00 m; Walls thickness 0,70-1,40 cm; Humidity in dry base: 7,0 - 11,5 %; Mean diameter 8,0 - 12,0 cm,

Key words: Guadua, Flection Resistance, Design Parameters.

INTRODUCCIÓN

La Guadua (*Angustifolia kunth*) es una especie endémica del Neotropico y representa un recurso muy valioso especialmente en las zonas rurales Colombianas.

Muchas veces se olvida o se desconoce la existencia de materiales de construcción que fueron la base para el desarrollo social y económico de muchas regiones. La guadua es uno de esos materiales que presentan grandes propiedades, jugando un papel fundamental en los ecosistemas como protectores y reguladores de los regímenes hídricos de cuencas y microcuencas, aportando biodiversidad debido a sus características y en el caso específico es un elemento alternativo y principal en muchas regiones de nuestro país como es el caso del eje cafetero, en el cual actúa como eje estructurante de las construcciones dadas las características físicas que este material ofrece.

Si bien es cierto, a pesar de la importancia de este elemento natural, son pocas las investigaciones que se han adelantado tanto a nivel Nacional como Internacional sobre las características físicas de este elemento sometido a flexión pura, no conociendo a la fecha factores o parámetros de diseños que sirvan como herramientas para la realización de cálculos estructurales a la hora de diseñar con este tipo de material.

En la literatura no se reportan ecuaciones de diseño para este tipo de elementos sometidos a flexión, por lo tanto en este principio se basa el objetivo principal trazado en esta investigación, el cual es el de obtener los parámetros de diseño para los elementos de guadua (*Angustifolia kunth*) sometidos a flexión pura a partir de ensayos realizados a escala natural.

REVISIÓN DE LITERATURA

González y Días (1992), determinaron los esfuerzos unitarios máximos (MOR), el esfuerzo en el límite proporcional (RLP) y el módulo de elasticidad (MOE), en las dos especies de guadua más utilizadas en el país como son la macana y la cebolla, utilizando a nivel de laboratorio probetas sometidas a flexión entre 0,5 y 0,8 m de longitud, encontrándose los siguientes intervalos de confianza para estos parámetros como se observa en la Tabla 1. Los resultados indican que la guadua se comporta como una madera maciza en cuanto a su resistencia a la flexión pura.

Igualmente, Mejía (1985), encontró esfuerzos en el límite proporcional (RLP) de 380 Kgf/cm² y módulos de elasticidad (MOE) de 95903 Kgf/cm² en probetas de guadua sometidas a flexión pura, cuyas muestras fueron recogidas en la ciudad de Manizales.

Tabla 1. Intervalos de confianza del esfuerzos unitarios máximos (MOR), el esfuerzo en el limite proporcional (RLP) y el modulo de elasticidad (MOE).

ESFUERZO	FLEXIÓN (Kg/Cm ²)
Esfuerzos unitarios máximos (MOR)	561 +/- 93
Esfuerzo en el limite proporcional (RLP)	371+/- 50
Modulo de elasticidad (MOE)	117210+/-93

Fuente: González y Días, 1992.

En otros países se han realizado algunos ensayos, cuyos valores varían notoriamente debido a las diferencias en las características físicas de cada uno de los elementos estudiados y analizados de manera particular, los resultados son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de investigaciones de elementos de guadua en probetas sometidos a flexión en otros países.

Investigador	Lugar	Especie	MOR (Kg/cm ²)	MOE (Kg/cm ²)
Sekar A.C. (1961)	India	Bambusa	827	182000
Meyer Ekelund citado por Martin (1981)	China	Bambusa	528	137383
Espinosa José citado por Martin (1981)	Filipinas	Bambusa	649	139425

A lo largo de la revisión de literatura desarrollada, se observa la variabilidad de los resultados obtenidos en otros países con respecto a los obtenidos en Colombia, donde sus diferencias son debidas a las variaciones en las características tanto físicas y morfológicas de las especies utilizadas en cada zona.

En Colombia Arbeláez (1997), determinó una expresión matemática para guaduas fisiológicamente maduras, que relaciona el diámetro, la longitud de entrenudos y el espesor de la pared a lo largo de la planta mostrando la proporcionalidad entre el diámetro y la altura del elemento, siendo esto un factor importante al momento de seleccionar y aprovechar

el material que se utilizará como elemento estructural.

$AT = 0,56P$

Donde:

AT: Altura total del elemento en m.

P: Perímetro tomado a 1 m de la base.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El trabajo se realizó en los laboratorios de Productos Forestales y Construcciones Rurales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia. Ubicados en Medellín, en la Sede de la Universidad núcleo del río, a 1568 msnm, bajo condiciones de laboratorio a 22°C de temperatura promedio y 63,5% de humedad relativa.

El material para los ensayos fue extraído del Centro Agropecuario Cotové de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, ubicado en el municipio de Santafé de Antioquia a 2 km de la cabecera municipal en la vereda el Espinal, coordenadas geográficas 60° 34' latitud Norte y 75° 50' longitud Oeste; altura 550 msnm. 26,3°C de temperatura. Precipitación anual 1244 mm. Condiciones correspondientes a la Zona de vida bosque seco tropical (bs-T), según clasificación de Holdridge.

METODOLOGÍA

Para el estudio se seleccionó entre la población de guaduas las mayores de tres años (maduras), libres de deformaciones y ataques de plagas o

enfermedades, óptima para la construcción de todo tipo de estructura liviana.

El material seleccionado fue preparado para la realización de los ensayos de flexión estática, en donde se utilizó la sobrecarga del elemento tomando materiales cuyas longitudes variaron entre 2,50 y 3,50 m con diámetros promedios de 10 cm, los cuales fueron sometidos a cargas ascendentes aplicadas en un punto en la mitad del elemento, realizando lecturas de flexión y cargas cada 50 lb. Las pruebas mecánicas se desarrollaron en una máquina para ensayos universales "Marco de Carpa" donde la duración del ensayo no fue menor a 6 minutos y no mayor a 10 minutos y con una velocidad de carga de 0,001 mm/seg.

Al material seleccionado se le realizaron mediciones de contenido de humedad, espesor de las paredes en los puntos extremos y diámetros promedios, adicionalmente se determinaron los valores de esfuerzos unitarios en el límite proporcional (RLP), módulo de elasticidad (MOE) y el esfuerzo de rotura (MOR), basados en las Normas Copant 455 (1972) para selección y colección de muestras de madera, 459 acondicionamiento de maderas destinadas a ensayos físicos y mecánicos y 460 para la determinación del contenido de humedad y las normas de la (American Society for Testing and Materials, ASTM, 1975).

Sotela (1991) en el Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, recomendó realizar mínimo seis ensayos de flexión a fin de poder descartar pruebas de dos

culmos que presenten imperfectos y tener un número de cuatro pruebas que sean estadísticamente significativas. Basados en lo anterior, se realizaron un total de veinticinco (25) ensayos de los cuales se tuvieron en cuenta dieciocho (18) de estos por encontrarse en buen estado.

Para obtener la ecuación que permite conocer la carga admisible del material sometido a flexión pura, se utilizó un modelo de regresión múltiple en donde se involucran los parámetros de interés como valores independientes (longitud, espesor, diámetro y humedad). Una vez obtenida la ecuación se determinó la relación existente entre los parámetros y su influencia en la resistencia del elemento cuando es sometido a flexión.

Finalmente, se obtuvieron algunos parámetros estadísticos como la media, la desviación estándar, coeficientes de variación, intervalos de confianza, valores mínimos, máximos y la mediana, cuyos datos fueron comparados con los obtenidos por González y Días (1992) a partir de ensayos con probetas del elemento, con el objeto de observar la variación obtenida en ambas pruebas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuación de flexión. Los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a los elementos sometidos a flexión pura pueden ser observados en la Tabla 3.

A partir de los datos de la Tabla 3 se obtuvo la ecuación (1) utilizando una regresión múltiple. Esta ecuación se obtuvo con un R Cuadrado de 75,029% y un error estándar de 0,1064 con una confiabilidad del 95%, la cual fue obtenida descartando el parámetro deflexión por considerarse poco significativo dentro de ésta.

$$\begin{aligned} \text{Carga} = & 442.7488 - 5581.56 \\ & \text{Longitud}^{1/50} + 547.2304 (\text{Diámetro}^{1/8} + \\ & 9 \text{ Longitud}^{1/45}) + 9.9496 * 10^{-9} \text{Espesor}^{70} \\ & + 3.27104 * 10^{-89} \text{Humedad}^{80} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q = & 442,749 - 5581,560 * L^{1/50} + \\ & 547,230 * (D_E^{1/8} + 9 * L^{1/45}) + 9,95 * 10^{-9} \\ & * E_p^{70} + 3,271^{-89} * H^{80}. \end{aligned}$$

Donde:

L: Longitud (cm)

D_E: Diámetro externo (cm)

E_p: Espesor de la pared (cm)

H: Humedad en base seca (%)

Q: Carga de falla (lb).

Tabla 3. Datos obtenidos en el laboratorio.

Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Espesor de la pared (cm)	Humedad (%)	Carga última (Lb)	Deflexión máxima (mm)
	11.25	0.98	11.11	526	36
270	10.25	1.05	9.87	531	37
	10	1.06	11.47	467	47

	8.25	0.78	10.97	313	48
	8.5	1.05	9.86	394	53
	8.25	1.08	10.33	460	62
300	8.5	1.05	10.74	398	48
	9.3	1	10.82	371	54
	9.25	1.07	11.08	433	64
	10.75	1.41	11.23	800	69
	11.75	1.06	11.4	658	42
	11.75	1.1	11	650	34
350	12	1.23	11.27	584	23
	10.75	0.85	11.38	680	37
	10	0.73	13.65	792	42
	10.1	1	10.3	602	27
	10.5	1.15	10.52	697	32
	9.65	1.12	10.66	719	35

Al analizar y darle valores aplicables a la ecuación (1) se observó que los datos obtenidos en el laboratorio presentan una variación del 5% frente a los teóricos, considerándose aceptable como margen de seguridad para la aplicación de la ecuación obtenida.

La carga máxima de diseño obtenida fue de 800 lb, con un valor mínimo de 313 lb, y una media de 559.72 lb lo cual es aceptable comparando estos valores con otras especies de maderas macizas.

Igualmente, de la ecuación (1) se analizó que la longitud es inversamente proporcional a la carga y que tanto el espesor como el diámetro son directamente proporcional a esta, de igual manera se puede observar que la humedad no es un parámetro determinante para la obtención de la carga máxima en la regresión obtenida,

siempre y cuando ésta se encuentre entre el 7 – 11,5% de humedad en base seca.

Determinación del esfuerzo unitario máximo (MOR). El esfuerzo unitario máximo se puede calcular a partir de la siguiente ecuación (2):

$$MOR = \frac{8 * P_{max} * L * D_E}{\pi * (D_E^4 - D_i^4)} \quad (2)$$

Donde:

D_E : Diámetro externo (cm)

D_i : Diámetro interno (cm)

L : Luz del elemento (cm)

P_{max} : Carga máxima (lb)

Determinación del esfuerzo en el límite proporcional (RLP). El esfuerzo en el límite proporcional esta

dado por la siguiente ecuación:

$$RLP = \frac{8 * Plp * L * D}{\pi * (D^4 - Di^4)} \quad (3)$$

Donde:

Plp: Carga en el limite proporcional

(lb).

Determinación del módulo de elasticidad (MOE).

$$MOE = \frac{4 * Plp * L^3}{3 * \delta * \pi * (D^4 - Di^4)} \quad (4)$$

Donde:

δ : Deformación (cm).

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones anteriores (2-4) y de los datos de la Tabla 3.

Cálculos estadísticos:

Valor Promedio o Media:

$$X = \sum X/n \quad (5)$$

Donde :

$\sum X$: Sumatoria de los valores.

n : Número de datos.

Desviación estándar de la muestra:

$$S = \sqrt{(\sum X^2 - \sum X^2/n)/(n-1)} \quad (6)$$

Coefficiente de Variación:

$$CV = (S * 100) / \bar{X} \quad (7)$$

Intervalo de Confianza Para el Valor Promedio:

$$IC = X + /- T_{(n-1)} * S\sqrt{n} \quad (8)$$

Donde :

IC: Intervalo de confianza.

T: Es un valor que depende de n-1 grados de libertad. Se determino el intervalo de confianza con una probabilidad del 95%.

Tabla 4. Cálculos de resistencias y de módulos de elasticidad.

PLP (lb)	MOR (kg/cm ²)	RLP (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)
460	415.71	363.54	109064.37
320	482.95	291.05	95833.13
270	444.44	256.95	84379.75
190	584.49	354.81	108861.02
285	538.10	389.24	104978.35
370	655.72	527.42	125281.85
275	603.97	417.32	153424.49
180	481.92	233.82	79838.28
345	537.99	428.65	108613.10
495	571.83	353.82	71551.01
480	492.02	358.92	109094.33
420	470.79	304.20	114219.49
348	306.37	183.54	78897.06
390	620.70	355.99	192891.88
485	960	590.24	146389.70
296	545.40	268.17	102436.95
312	516.26	231.09	71643.85
380	653.87	345.57	106580.96

En la Tabla 5 se aprecian los resultados estadísticos de los parámetros más relevantes a tener en cuenta en la toma de decisiones, calculados a partir de las ecuaciones 5-8:

Tabla 5. Cálculos estadísticos.

	MOR (kg/cm ²)	RLP (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	CARGA (kg/cm ²)
Media	549,03	347,46	109109,97	559,72
Desviación estándar	130,88	99,43	29908	144,76
Coefficiente varianza (%)	23,83	28,61	27,41	25,86
Intervalo de confianza	549,03 ± 53,67	347,46 ± 40,77	109109,97 ± 12265	559,72 ± 59,34
Valor mínimo	306,37	183,54	71551,01	313
Valor máximo	960	590,24	192891	800
Mediana	538,04	354,31	107597	557,5

Los resultados obtenidos en la Tabla 5 comparados con los de González y Díaz (Tabla 6), no muestran una variabilidad significativa. La resistencia unitaria máxima (MOR) varió en un 2,6 %, el modulo de elasticidad (MOE) en un 7% y la resistencia en el limite proporcional (RLP) en un 6,3%.

Tabla 6. Comparación entre los resultados obtenidos por González y Días (1992) y los actuales.

González y Días (1992)	Actuales (Valores en kg/cm ²)	Variación (%)
RLP : 371 ± 50	RLP : 347 ± 40,77	6,3
MOR : 561 ± 93	MOR : 549 ± 53,67	2,6
MOE : 117210 ± 16730	MOE : 109109,97 ± 12265,93	7,0

De la ecuación 1 dejando el espesor, el diámetro y la humedad constantes, se obtiene la variación de la carga cuando varía la longitud, lo cual puede ser observado en la Tabla 7.

Tabla 7. Longitud vs Carga frente a los demás parámetros constantes.

Longitud	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
Carga	518,1	518	518	518	517,9	517,9	517,9	517,8	517,8	517,8	517,8

Los resultados de la Tabla 7 muestran una variación de la carga del 0.005% por cada 10 cm de aumento en la longitud, lo que nos indica que la longitud no es un parámetro importante incidente en las cargas de diseño para las luces seleccionadas en ésta investigación.

Igualmente, a partir de la Ecuación 1 manteniendo la humedad y el espesor constantes bajo longitudes de 250, 300, y 350 centímetros observamos como es el comportamiento de la carga frente a una variación del diámetro (ver Tabla 8).

Tabla 8. Variación de la carga frente al diámetro con los demás parámetros constantes.

DIAMETRO cm	CARGA		
	LONGITUD 250 cm	LONGITUD 300 cm	LONGITUD 350 cm
8,25	489,59	489,42	489,29
8,35	490,66	490,44	490,21
8,45	491,72	491,56	491,27
8,55	492,77	492,61	492,33
8,65	493,82	493,65	493,37
8,75	494,85	494,68	494,40
8,85	495,87	495,70	495,52
8,95	496,88	496,71	496,53
9,05	497,88	497,71	497,53
9,15	498,73	498,70	498,52
9,25	499,84	499,68	499,60
9,35	500,82	500,65	500,47
9,45	501,78	501,62	501,43
9,55	502,74	502,57	502,49
9,65	503,68	503,52	503,43
9,75	504,62	504,45	504,37
9,85	505,55	505,38	505,37
9,95	506,47	506,30	506,22
10,05	507,38	507,21	507,13
10,15	508,29	508,21	508,04
10,25	509,19	509,01	509,00
10,35	510,07	509,90	509,80
10,45	510,95	510,78	510,65
10,55	511,83	511,66	511,46
10,65	512,69	512,52	512,38
10,75	513,55	513,38	513,22
10,85	514,41	514,24	514,04
10,95	515,25	515,08	515,00
11,05	516,09	515,92	515,90
11,15	516,93	516,75	516,55
11,25	517,75	517,58	517,49
11,35	518,57	518,40	518,32
11,45	519,38	519,21	519,13
11,55	520,19	520,02	519,96
11,65	520,99	520,83	520,78
11,75	521,78	521,62	521,49
11,85	522,58	522,41	522,37
11,95	523,36	523,19	523,01
12,05	524,13	523,97	523,87

A partir de los resultados obtenidos es un parámetro que no incide en la Tabla 8 se reitera que la longitud notoriamente en las cargas de diseño,

ya que por cada 50 cm de aumento en la longitud a diámetros iguales solamente se tiene una variación en la carga del 0.03%, caso contrario sucede

con el diámetro, el cual por cada 0,1 cm de aumento en este parámetro se aumenta la carga en un 0,2%.

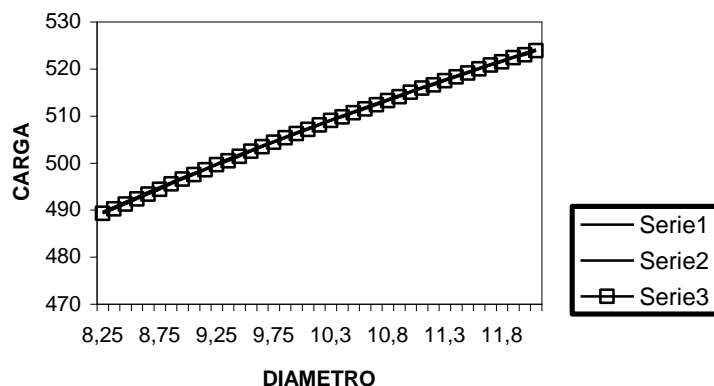


Figura 1. Variación de la carga vs diámetro.

Donde de la Figura1:

Serie1: Longitud de 2.5 metros.

Serie2: Longitud de 3.0 metros.

Serie3: Longitud de 3.5 metros.

Al igual que los resultados obtenidos en la Tabla 8, la Figura 1 muestra la poca variabilidad de la carga al mantener los valores de longitud constantes, convirtiéndose el diámetro y el espesor de las paredes en un parámetro importante para la resistencia del elemento

Así mismo, al mantener el espesor, el diámetro y la longitud constantes en la ecuación 1, se observa como varía la

carga frente a la humedad (ver Tabla 9) y cuyo comportamiento y análisis lo podemos obtener de la Figura 2.

De la Tabla 9 y en la Figura 2, se observa que para rangos entre el 1 y el 12% de contenidos de humedad la carga admisible del elemento permanece constante, a partir del 12,5% de humedad la resistencia a la rotura aumenta notoriamente, aspecto que en la realidad debe tenerse en cuenta ya que al secar los elementos disminuye la resistencia, puesto que estos siempre se encontraran en rangos inferiores al 12% de humedad en base seca.

Tabla 9. Variación de la carga frente a la humedad con los demás parámetros constantes.

HUMEDAD (%)	CARGA (Lb)
7,0	511,743
7,5	511,743
8,0	511,743
8,5	511,743
9,0	511,743
9,5	511,743
10,0	511,743
10,5	511,743
11,0	511,743
11,5	511,744
12,0	511,750
12,5	511,928
13,0	516,011
13,5	599,118
14,0	2114,72

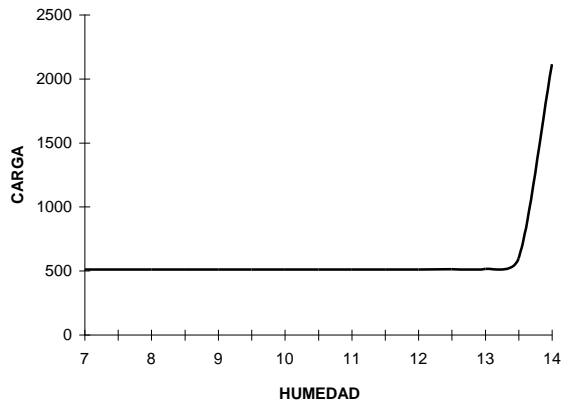


Figura 2. Humedad vs carga.

De igual forma manteniendo la humedad, el diámetro y la longitud constantes en la ecuación 1, observamos como varía la carga frente

al espesor (ver Tabla 10) y cuyo comportamiento y análisis se presenta en la Figura 3.

Tabla 10. Variación de la carga frente al espesor con los demás parámetros constantes.

ESPESOR (cm)	CARGA (Lb)
0,70	511,743
0,75	511,743
0,80	511,743
0,85	511,743
0,90	511,743
0,95	511,743
1,00	511,743
1,05	511,743
1,10	511,743
1,15	511,743
1,20	511,747
1,25	511,800
1,30	512,680
1,35	524,960
1,40	680,30

Los resultados de la Tabla 10 indican que la carga aumenta directamente proporcional al espesor, y se mantiene constante en un rango entre 0,7 y 1,15 cm.

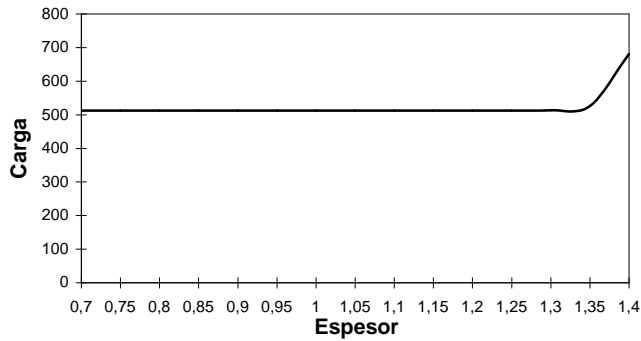


Figura 3. Carga vs espesor.

A partir de los datos obtenidos a nivel de laboratorio (Tabla 1) se encontró una ecuación que muestra el comportamiento de la deflexión frente a la longitud, con elementos sometidos a distintas cargas, donde se obtuvo un R cuadrado de 98.6067% y de un error estándar de 0.01611 siendo este resultado confiable para la aplicación de dicha ecuación.

$$\text{Deflexión} = (6.84021 + 1.5066 * 10^{-12} * \text{Carga}^4) / (1 - 0.024 * \text{Longitud}^{0.63}) \quad (9)$$

En la Tabla 11, se observa la variación de la reflexión frente a la longitud a partir de cargas constantes en la ecuación 9.

Tabla 11. Variación de la deflexión frente a la longitud a partir de cargas constantes.

LONGITUD (cm)	DEFLEXIÓN (mm)			
	Carga 500 Lb	Carga 550 Lb	Carga 600 Lb	Carga 650 Lb
250	31,21	31,41	31,67	32,00
270	37,79	38,03	38,35	38,74
290	47,53	47,83	48,22	48,73
310	63,48	63,88	64,41	65,08
330	94,43	95,02	95,80	96,80
350	180,37	181,50	183,0	184,91

A partir de la Tabla anterior se obtuvo la Figura 4, en la cual se observa la poca variabilidad de la deflexión frente a los incrementos de la carga, más si se nota la variación de la deflexión frente a los incrementos de la longitud. Anotación esta que se constituye en un aspecto fundamental a tener en cuenta cuando se diseñe con este tipo de estructuras, puesto que por sus características propias, la guadua tiende a comportarse de esta manera.

Así mismo, a partir de los resultados mostrados en la Tabla 11 se observa que la deflexión de los elementos actúan directamente proporcional al incremento de la longitud, mientras que a una longitud constante por cada 50 Lb de aumento en la carga la deflexión varía en un 6% aproximadamente. Los datos reales de la deflexión obtenidos en la Tabla 1 varían en un 12 % de los datos teóricos mostrados en la Tabla 11.

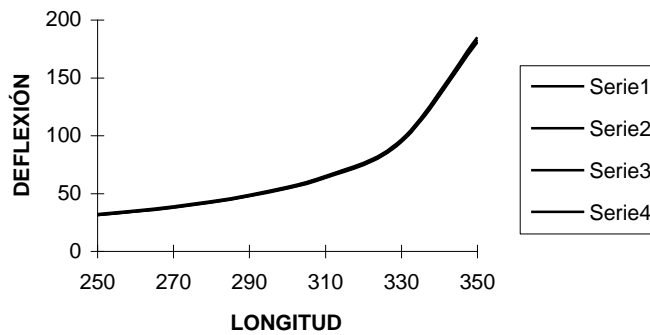


Figura 4. Deflexión vs longitud.

Donde de la Figura 4:

Serie1: Carga de 500 Lb.

Serie2: Carga de 550 Lb.

Serie3: Carga de 600 Lb.

Serie4: Carga de 650 Lb.

De la Figura 5, se puede observar que el comportamiento del material en condiciones normales de uso (Humedad inferior al 12%, diámetros mayores de 10 cm y longitudes entre 2,5 y 3,5 m) y con las cargas evaluadas se encuentran dentro del límite elástico del material, por lo tanto es recomendable no sobrepasar estos valores admisibles de esfuerzo.

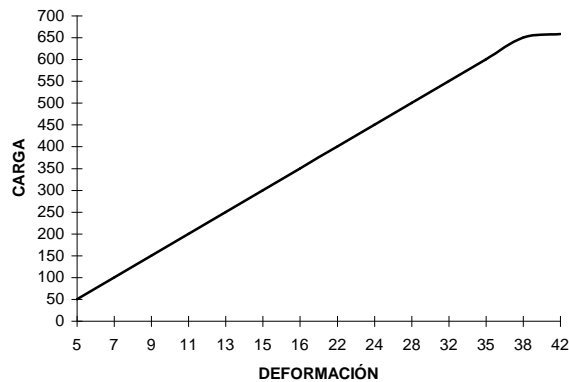


Figura 5. Curva característica de deformación vs carga de elementos de guadua sometidos a flexión pura.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos para la resistencia unitaria máxima (MOR), el modulo de elasticidad (MOE) y la resistencia en el limite proporcional (RLP) no varían significativamente a los obtenidos por González y Díaz (1.992) lo que brinda una alta confiabilidad en la metodología utilizada.
- Estos resultados muestran que los elementos de guadua sometidos a flexión brindan una gran posibilidad de aplicación en aquellas construcciones con materiales no convencionales.
- Las gráficas deformación vs carga poseen un comportamiento similar a las de las maderas macizas
- sometidas a flexión, esto se debe a la distribución de la fibra a lo largo de la longitud del elemento lo cual constituye el 40% de la sección transversal.
- Esta ecuación puede ser aplicada con confiabilidad al igual que los factores de diseño como la resistencia unitaria máxima (MOR), el modulo de elasticidad (MOE) y la resistencia en el limite proporcional (RLP) en la guadua macana cuya procedencia y características de los parámetros determinados (longitud, espesor, etc) sean similares a los utilizados en esta investigación.
- Utilizar esta ecuación para elementos de guadua sometidos a flexión pura con un factor de seguridad entre el 10-15%, cuyo

- valor dependerá de los análisis de cargas del diseñador.
- Esta ecuación debe ser aplicada a elementos cuyas dimensiones o parámetros se encuentren entre los siguientes rangos : Longitud (250-350 cm), Humedad (7.0-11.5%), Diámetro (8.25-12 cm), Espesor (0.70-1.40), los cuales nos garantizan un soporte de cargas entre 500-620 lb.
 - Realizar nuevas investigaciones con elementos de guadua en paralelo sometidos a flexión, lo cual puede brindar un mayor campo de aplicación.
 - Investigar el comportamiento de la guadua sometida a compresión a escala natural y proponer posibles alternativas con el fin de aumentar la resistencia de estos elementos cuando son sometidos a estos tipos de cargas.
 - Complementar esta investigación realizando mediciones de hidro-elasticidad de los elementos.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D-1666. *En*: Annual

Book of ASTM Standars: Designation. Philadelphia: The society, 1975. p.459-485.

ARBELAEZ ARCE, Anacilia. Relación de las características morfológicas del culmo de la guadua. Documento interno. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1997. 45p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Panamericanas. Buenos Aires: COPANT, 1972. 584 p.

GONZÁLEZ C., Eugenia y DÍAZ, John. Propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia kunt.* Medellín. 1992. 145p. Trabajo de Grado (Ingenieros Agrícolas). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

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

SEKAR, A.C. Note strenght of dry bamboo *Dendrocalamus strictus* from *Madraya pradesh.* *En*: Indian for. Vol. 87 No.10 (1961); p.611-613.

SOTELA M., Jaime 1991. Propiedades físicas y mecánicas de la especie "Guadua" en Costa Rica. San José: Universidad de Costa Rica, 1991. p.60-91. (Informe I NII).

Aprobado para su publicación:

Febrero 20 de 2002