

Evaluación de las propiedades mecánicas de la *Guadua Angustifolia Kunth* venezolana

Lorena Carballo¹, Gustavo Kosler², Heriberto Echezuría³

lorenacarballo1405@gmail.com¹, kosler.gustavo@gmail.com², hechezuria51@gmail.com³

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

Resumen: Se ensayaron probetas de distintas secciones de culmos de *Guadua Angustifolia Kunth*. Los ensayos fueron a compresión paralela a la fibra y a flexión para las zonas alta, media y baja de los culmos. Se evidencia que las zonas superiores de los culmos tienen las mejores capacidades de resistir tensiones de compresión y muestran módulos de compresión más altos que las otras dos secciones de los culmos. La sección media parece ser la menos resistente de todas con las menores tensiones y módulos a compresión. En general se observa bastante dispersión en los resultados. Existe relación entre el espesor “efectivo” o aquel que no considera las fibras menos resistentes hacia el interior de la sección del culmo con el incremento de resistencia a la tensión. Esto sugiere la utilidad de utilizar dicho espesor efectivo para estimar los parámetros de ingeniería en lugar del espesor total de la sección. El comportamiento de deformación diametral en la sección media de las probetas sometidas a compresión indica que ocurren muchas desviaciones del comportamiento esperado de aumento lineal de la carga con la deformación diametral. Tanto la dispersión como las desviaciones del comportamiento esperado parecen estar relacionadas con las variaciones propias de la madera, sin embargo, aún los valores más pequeños resultan mayores que los encontrados en la literatura para otras variedades de *Guadua*. Los ensayos de tensiones a flexión presentaron fallas en las fibras a compresión, lo cual corrobora que su capacidad a tensiones de tracción es mayor que a tensiones a compresión. Las grietas longitudinales pueden aparecer sin estar asociadas a agujeros presentes previos a la carga del material y en general dependen de la deformación alcanzada por la sección circular original.

Palabras Clave:

Guadua Angustifolia Kunth; resistencia a tensiones de compresión, módulo de compresión; módulo de rotura; límite de proporcionalidad.

Evaluation of mechanical properties from venezuelan *Guadua Angustifolia Kunth*

Abstract: Probes from three different parts of the *Guadua Angustifolia Kunth* stem were tested. Tests included compression parallel to the fiber and flexion for samples from the upper, middle and lower part of the plant. Results indicate that the upper part of the plant stem has better capacity to resist compression tensions and has larger compression modulus than the middle and lower sections. The middle section appears to be the weakest of all yielding lower compression tensions and moduli. In general a broad dispersion of the data is observed. There exists a relationship between “effective” thickness, which does not consider the softer fibers near the center of the cross section with high compression tensions. This suggests that using this corrected thickness would be helpful to estimate engineering parameters instead of the total thickness of the cross section. The horizontal deformation subjected to compression tensions indicates that many deviations occur from expected linear behavior. Both, the data dispersion as well as the deviation from the expected linear behavior appear to be related to the natural variation of this type of wood, however, even the lowest values encountered are higher than those reported in the literature for other *Guadua* plants. Flexion tests exhibited failure at compression fibers, which supports the fact that resistance to traction tension is larger than to compression tension. Longitudinal cracks can appear without any noticeable damage or holes in the stem wall. In general, they depend on the deformation reached by the cross section during testing.

Keywords:

Guadua Angustifolia Kunth; compressive strength, modulus of compression, modulus of rupture, limit of proportionality.

I. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones con *Guadua Angustifolia Kunth* como materia prima se han realizado desde décadas pasadas [1], pero los trabajos orientados a las propiedades mecánicas de este material tienen un enfoque relativamente nuevo en el país, lo que conlleva a que la cantidad de estudios desarrollados hasta el momento sean limitados a nivel nacional. Es por ello que el Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería de la Universidad Católica Andrés Bello (CIDI-UCAB), en conjunto con el Laboratorio de Materiales de Construcción y tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello, han tomado la iniciativa para aportar información útil para el desarrollo de futuras normas relacionadas con las propiedades mecánicas de este material y de esta forma, lograr estar a la altura de los avances a nivel mundial en términos de investigación, construcción y desarrollo sostenible.

A tal efecto se plantearon los siguientes objetivos para este trabajo,

- Analizar el comportamiento mecánico de secciones de bambú al ser sometido a tensiones de compresión paralelas a las fibras.
- Analizar el comportamiento mecánico de secciones de bambú al ser sometido a tensiones de flexión.

II. MARCO METODOLÓGICO

Las muestras ensayadas en este trabajo fueron obtenidas de nueve (9) culmos de *Guadua Angustifolia Kunth*, con diámetros variables entre tres (3) y cinco (5) pulgadas y longitudes aproximadas a los seis (6) metros. Dichos culmos fueron recuperados de plantaciones en los alrededores de Curbatí; localidad del municipio Pedraza en el estado Barinas, Venezuela, los cuales fueron debidamente procesados contra los ataques de insectos y plagas.

Se elaboraron un total de 26 probetas cilíndricas según se indica en la Tabla I.

Ensayo	Cantidad de Probetas
Compresión paralela entrenudo	14
Compresión paralela con nudo	4
Felxión	8
TOTAL	26

Tabla I: Distribución de probetas para ensayos mecánicos.

Dichas probetas se realizaron de acuerdo con las siguientes normas

- NTC 5525. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua Angustifolia Kunth*. (2007) [2].
- IS 6874:2008. Indian Standard Method of test for Bamboo (First Revision). (2008) [3].

Las probetas se confeccionaron de distintas partes del culmo —Inferior, media y superior— a fin de evaluar cualquier diferencia potencial entre los valores de los parámetros evaluados en este trabajo. El procedimiento se describe a continuación:

- Identificación de las distintas partes del culmo
- Medición de los diámetros y espesores perpendiculares y diagonales tanto para la sección transversal inferior como para la sección superior del culmo, identificadas a partir del sentido del crecimiento de la *Guadua*.
- Identificación de defectos presentes (rajaduras, curvas pronunciadas, perforaciones).
- Rotulado en los diferentes culmos, tal como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1: Identificación de las probetas por tipo de ensayo.

1) Preparación para ensayos de tensiones a compresión:

Para efectos de esta investigación, se tomaron muestras del culmo sin nudos, así como también, con nudos en la luz media. La magnitud longitudinal utilizada fue igual a tres (3) veces el diámetro promedio externo, tal como se ilustra en la Figura 2.

La distribución por sectores del culmo se indica en la Tabla II.

Tabla II: Cantidad de probetas para ensayos a tensiones de compresión. **Fuente:** Elaboración propia

Ensayo a tensiones de compresión	
Ubicación probeta	Cantidad probetas
Superior	8
Media	3
Inferior	7
TOTAL	18

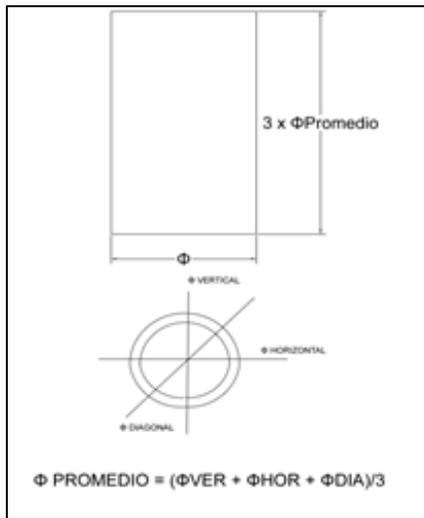


Figura 2: Dimensiones de las probetas. **Fuente:** Elaboración propia

2) *Preparación para ensayos de tensiones a flexión:*

Para determinar la tensión última ante sollicitaciones por tensiones a flexión, se ensayaron ocho (8) probetas de aproximadamente 3 m de largo. Puesto que los culmos se dividieron en tres segmentos, parte inferior, parte media y parte superior para los distintos ensayos realizados, estas probetas sólo fueron tomadas de la parte media del culmo para estos ensayos ya que los culmos no eran lo suficientemente largos para preparar probetas de este largo para las tres secciones.

Por otra parte, debido a las diferencias que presentaban las normas tomadas como referencias, en cuanto a la forma de apoyo de las probetas durante el ensayo se decidió realizar cuatro (4) ensayos según las directrices de la norma colombiana y cuatro (4) ensayos según la norma india, según se muestra en la Tabla III.

3) *Espesor “efectivo”:*

Debido a que la guadua es un material compuesto por varias capas de materiales fibrosos de distinta textura y composición, cada una con propiedades diferentes, como lo expresa Londoño, (2002) [4]. En la Figura 3 se ilustran las tres secciones típicas para la Guadua Angustifolia: externa, media e interna de una observación visual ampliada de la sección transversal del culmo.

Claramente, la Figura 3 indica la existencia de tres zonas de fibras y que las más externas son las más leñosas lo cual se evidencia por estar muy aglomeradas y compactas. Por lo tanto, las mismas soportan la mayor parte de las sollicitaciones de carga tanto a tensión como a compresión. De la misma manera, destaca en la Figura 3 que en la parte más interna, las fibras se hacen más dispersas produciendo una zona blanda y dúctil por lo que la misma no es capaz de resistir prácticamente ninguna carga. Como parte de la investigación, se midieron los “espesores efectivos”, correspondientes a la zona externa de los distintos sectores del culmo. Posteriormente, se hizo una correlación entre las tensiones vs el porcentaje que representa la zona externa del espesor promedio y se encontró una correlación lineal entre ambas.



Figura 3: Sección transversal de una probeta de Guadua Angustifolia Kunth. **Fuente:** Elaboración propia

Ensayo a tensiones de flexión							
Denominación Probeta	Sección	Dimensiones					Norma referencial
		Diámetro ext. Prom (cm)	Diámetro int. Prom (cm)	Longitud 30°Dext (cm)	Longitud efectiva (cm)	Espesores prom (cm)	
BF01M5	Cilíndrica	9.4	5.06	313	284	1.98	IS 6874:2008 India
BF01M4	Cilíndrica	9.66	5.83	305	273	1.89	IS 6874:2008 India
BF01M3	Cilíndrica	10.31	6.46	315	274	1.79	IS 6874:2008 India
BF01M8	Cilíndrica	10.04	6.18	300	267	1.52	IS 6874:2008 India
BF01M2	Cilíndrica	9.08	6.63	307	216	1.26	NTC 5525 Colombia
BF01M6	Cilíndrica	8.175	4.05	6.37	219	2.163	NTC 5525 Colombia
BF01M7	Cilíndrica	10.675	5.98	6.31	249	2.456	NTC 5525 Colombia
BF01M9	Cilíndrica	8.475	4.108	5.71	298	1.875	NTC 5525 Colombia

Tabla III: Caracterización de muestras-tensiones a flexión. **Fuente:** Elaboración propia

III. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN

Fue necesario diseñar y construir algunos equipos que permitieron desarrollar el trabajo de investigación, asegurando la precisión en la toma de mediciones. Dichos equipos se describen a continuación.

A. Equipo para ensayo de tensiones a compresión

Para medir la variación longitudinal de las probetas cilíndricas de la *Guadua* sometidas a carga axial de compresión fue necesario construir un equipo capaz de adaptarse a la variedad de diámetros existentes en la población. Para ello, se eligieron dos aros de acero macizo de sección circular (A y B) cuyos diámetros fuesen mayores que aquellos de las muestras existentes. El principal criterio de diseño fue mantener ambos aros totalmente paralelos entre sí y con libre desplazamiento vertical al aproximarse el anillo A hacia el B, permitiendo al transductor, registrar la deformación de la probeta cilíndrica. Por consiguiente, fueron dispuestos verticalmente cuatro guías y cuatro pistones que permiten un desplazamiento concéntrico

En cuanto a la sujeción del equipo a la probeta, era necesario lograrlo sin que se generaran fisuras en el sentido de las fibras al momento de entrar en contacto con la *Guadua*, así como que el equipo se mantuviese centrado y estable al momento de aplicar la carga, sin que se produjera deslizamiento. Para lograr esto, se utilizaron cuatro (4) pernos con punta cónica en cada aro, tal como se ilustra en la Figura 4 donde se aprecia el equipo en planta, perfil e instalado.



Figura 4: Equipo para medición de deformaciones axiales definitivo, vista lateral, vista en planta y perfil

B. Equipo para ensayo de tensiones a compresión, variación perimetral y diametral

Debido a que se trabajó con una fibra natural las deformaciones en la periferia de la probeta no son necesariamente simétricas en cualquier punto de medición. Por esta razón, para medir la deformación diametral de la probeta sometida a compresión se utilizó un alambre de acero entorchado, colocado alrededor del perímetro externo de la probeta. De esta manera, a partir de la medición de un sensor lineal TLDT del cambio en el perímetro de la muestra se obtiene la deformación diametral de la zona central de la probeta producto de la aplicación de las cargas axiales.

Para mejorar la precisión de las mediciones diametrales se diseñaron y fabricaron dos soportes, uno que permite sostener el TLDT y albergar el mecanismo que mantiene el alambre en contacto con la probeta, y otro que permite fijar la guaya de acero a un punto inmóvil. Ambos soportes se sujetan a bases magnéticas, lo cual permite realizar ensayos con probetas de diámetros variables y garantizar que la medición siempre sea tangencial a la misma. En la Figura 5 se ilustra el equipo para medición perimetral montado para la realización de un ensayo.

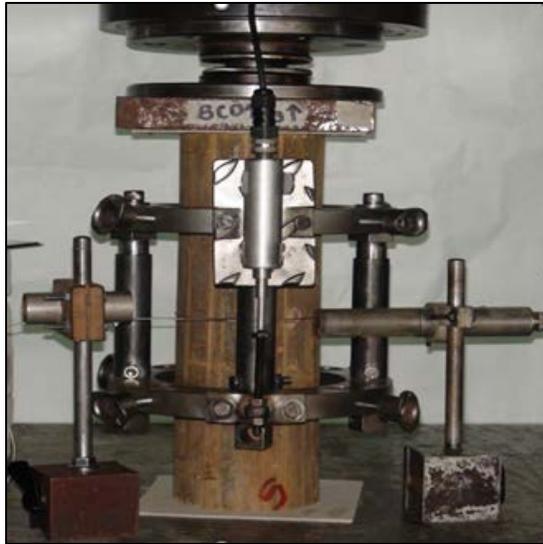


Figura 5: Equipo para medición perimetral montado junto con el de compresión. Se observa el alambre entorchado cuyos extremos van a un medidor de elongación horizontal que permite detectar los cambios en el perímetro de la muestra

C. Apoyo hemisférico para ensayo con tensiones a compresión

Para obtener una distribución uniforme de la carga en los extremos de la probeta, fue desarrollado un apoyo hemisférico (rótula de acero) mostrada en la Figura 6. En el mismo se utilizaron dos láminas circulares de acero, que a su vez albergan una esfera del mismo material, lo cual permitía que la carga en acción fuese siempre perpendicular a la cara de la probeta debido a su capacidad de adaptación a cualquier posible desviación de la carga entre las caras de la misma.



Figura 6: Apoyo hemisférico

D. Equipo de medición para ensayo de tensiones de flexión

Para cargar las probetas de flexión en dos puntos fueron desarrollados una serie de apoyos y accesorios realizados a base de madera dura. Esto se ilustra en la Figura 7. En este caso se empleó madera de Puy. A tal efecto se siguieron las especificaciones plasmadas en las normas colombianas [2] e indúes [3]. Para la conducción del ensayo, era necesario que los culmos descansaran sobre los nudos o lo más cercano a ellos para evitar que los apoyos fabricados generasen fallas locales, por lo que los mismos contaban con una museca que permitía la libre rotación de la probeta tras la acción de las cargas. En total se desarrollaron ocho (8) de estos apoyos. Adicionalmente, se elaboraron dos cilindros macizos del mismo material, que permiten el desplazamiento lateral sobre los apoyos bajo la acción de las cargas. En la Figura 7 se muestra el montaje para la aplicación de las cargas de flexión en las probetas.

Con el objeto de cuantificar las deflexiones generadas, se hizo un sistema de medición a partir de una regla calibrada de 60 cm, una guía (aguja) adherida a la probeta en su eje neutro y una cámara de alta definición, utilizada para captar todo el proceso de deflexión del culmo durante el ensayo, según se ilustra en la Figura 10



Figura 7: Montaje de los ensayos a flexión en probetas de guadúa con los apoyos diseñados para lograr las cargas

IV. RESULTADOS

A. Tensión última y Módulo de Elasticidad de tensiones a compresión paralela a las fibras.

1) Tensión a compresión Vs Deformación Longitudinal:

Zona superior:

Con base a los datos obtenidos experimentalmente se graficó el desarrollo de las tensiones a compresión paralela a las fibras respecto a la deformación axial para probetas obtenidas de la parte superior de los distintos culmos, las cuales se muestran en la Figura 8. En dicha figura se evidencia una gran variabilidad en las diferentes curvas, producto de la heterogeneidad inherente del material en estudio. Dicho comportamiento posiblemente obedece a las características de crecimiento, defectos naturales y espesores medios de las secciones transversales para los distintos culmos ensayados.

En general, se observa que las gráficas inician con un comportamiento lineal, hasta el punto 1, que corresponde al límite de proporcionalidad. A partir de allí, su comportamiento se podría asociar a la generación de grietas internas y/o externas, así como también, por el reacomodo de las fibras bajo el efecto de las cargas axiales a las cuales estuvieron sometidas. Las tensiones a compresión para la zona superior tienen una máxima de 669 kgf/cm² y una media de 454 kgf/cm².

tensiones de compresión con la deformación axial y la capacidad máxima de resistencia de las probetas de la zona media pertenecientes a distintos culmos, tal como se muestra en la Figura 9.

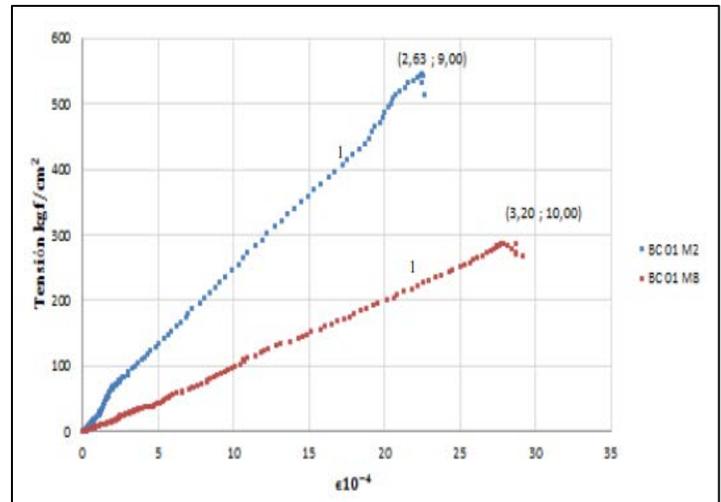


Figura 9: Tensión a Compresión Vs Deformación Longitudinal; Zona Media del culmo. Fuente: Elaboración propia

Se evidencia en la Figura 9 que las respuestas de las probetas de esta zona del culmo también inician con un comportamiento lineal, hasta el punto 1, el cual, corresponde al límite de proporcionalidad. A partir de ese punto las mismas experimentan cambios en sus pendientes. De nuevo, ese comportamiento posiblemente obedece a las características de crecimiento, defectos naturales y espesores medios de las secciones transversales para los distintos culmos ensayados. De hecho, en la probeta BC01M8 se observaron pequeñas grietas internas preexistentes antes del ensayo, lo que pudo haber inducido a una falla prematura.

Para la zona media la mayor tensión a compresión resultó de 550 kgf/cm² con una media de 406 kgf/cm².

Zona inferior:

En la Figura 10 se evidencia nuevamente, la gran variabilidad en las diferentes curvas, producto de la heterogeneidad inherente del material en estudio. Al igual que en los casos anteriores para las secciones superior y media de los culmos, se observa que las respuestas de las probetas inician con un comportamiento lineal, con ciertas distorsiones para algunas curvas. Por esta razón para esta zona no fue posible identificar claramente el punto 1 de las distintas

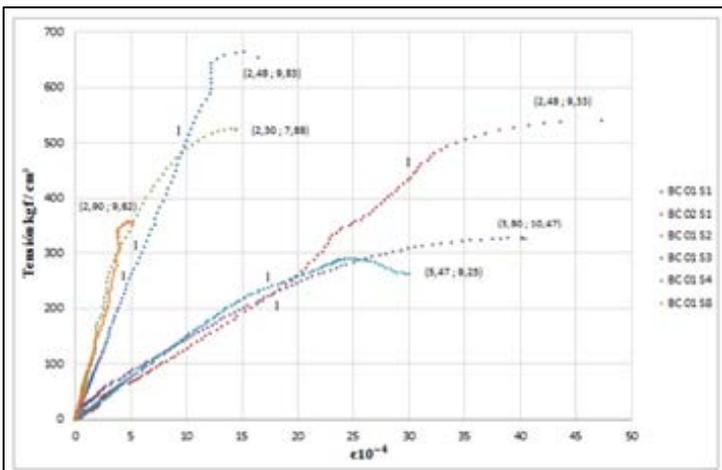


Figura 8: Tensión a Compresión Vs Deformación Longitudinal; Zona Superior del culmo. Fuente: Elaboración propia

Zona media:

Al igual que para la parte superior de los culmos existe una variación importante en el desarrollo de las

curvas. No obstante, se evidencian cambios en las pendientes de las distintas curvas. Esta variación podría estar asociada con la generación de grietas internas y/o externas, así como también, por el reacomodo de las fibras bajo el efecto de las sollicitaciones de cargas axiales a las cuales se ven sometidas. Para la zona inferior la máxima tensión fue de 607 kgf/cm² y la media fue de 404 kgf/cm².

transversal. Dicho gráfico se muestra a continuación en la Figura 11: Se observa que a medida que aumenta el espesor de la sección externa aumenta la carga a compresión que resisten las briquetas. Tomando en consideración este resultado, es conveniente medir las tensiones tanto a compresión como a tracción con relación a la sección transversal efectiva en lugar de la promedio. De esta manera se tomaría en cuenta la zona que realmente aporta resistencia a la *Guadua Angustifolia*.

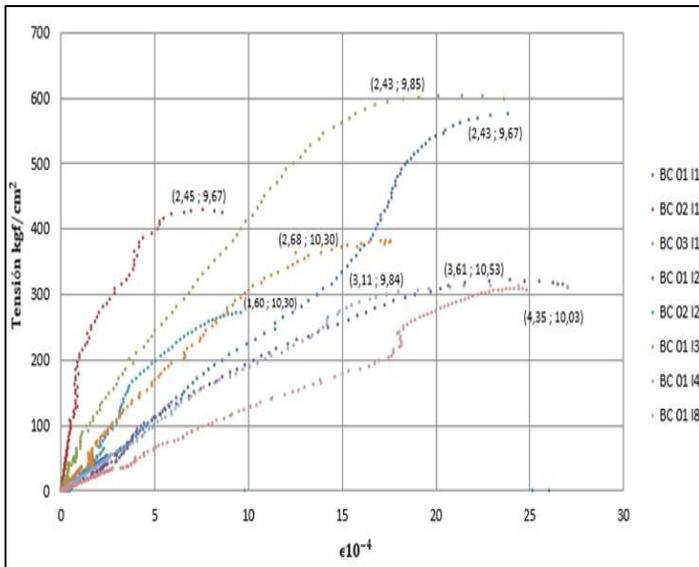


Figura 10: Tensión a Compresión Vs Deformación Longitudinal; Zona Inferior del culmo. **Fuente:** Elaboración propia

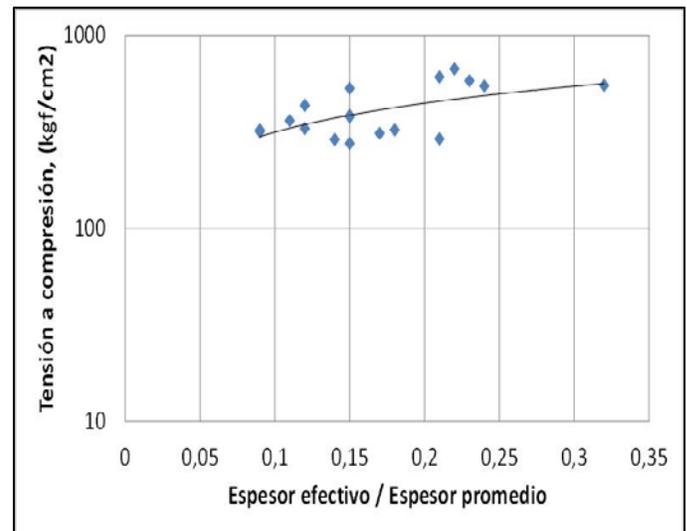


Figura 11: Tensión a Compresión vs Razón de Espesor efectivo/Espesor promedio. **Fuente:** Elaboración propia

La tensión media general a compresión para los tres sectores de la planta estudiados fue de 417 kgf/cm². Para evaluar la influencia de los nudos en la resistencia a las tensiones a compresión algunas probetas se prepararon incluyendo los nudos en su sección media. Es bueno tener en consideración que la presencia de agujeros en las paredes de los culmos realizados durante el proceso de inmunización y/o perforaciones hechas por insectos, antes del inmunizado, fomenta la aparición de grietas longitudinales y fallas locales por aplastamiento durante la aplicación de la carga axial del ensayo a tensiones de compresión

Espesor "Efectivo"

A fin de validar la hipótesis de que las fibras externas soportan más tensión que las internas se procedió a preparar un gráfico entre las tensiones máximas a compresión de las briquetas contra la razón del espesor efectivo con el espesor promedio de la sección

2) Módulo de Elasticidad de tensiones a compresión paralela a las fibras.

Con los datos de carga y deformación obtenidos experimentalmente, se calcularon los módulos de elasticidad a la compresión con las pendientes obtenidas en los tramos comprendidos entre el 10% y 60% de la tensión última de las Figuras 8 a 10. La Tabla 4 muestra dichos módulos junto con otra información relevante relacionada con dicho cálculo.

Los valores de los módulos también dependen de la zona del culmo estudiada y presentaron alta dispersión. Para la parte alta el valor máximo del módulo a compresión resultó de 2.679.752 kgf/cm² y su promedio fue 859.520 kgf/cm².

Para la zona media el máximo módulo a compresión resultó de 1.248.062 kgf/cm² con un promedio de 538.253 kgf/cm² y, para la zona inferior, el máximo

módulo a compresión fue de 3.936.524 kgf/cm² con un promedio de 708.109 kgf/cm².

El valor promedio general del módulo a compresión es de 730.272 kgf/cm². Los valores reportados en la literatura para el módulo a compresión de la guadúa [5] indican que el mismo está alrededor de los 101.972 kgf/cm² (10.000 MPa), lo cual indica que la media de las muestras ensayadas en este trabajo está bastante por encima de dicho valor. Aún la media de los valores más pequeños para cualquiera de las tres secciones estudiadas, los cuales constituyen el 83% de los datos (véase la Tabla 4) es igual a 325.337 kgf/cm² que sigue siendo mayor que el valor encontrado en la literatura.

Es conveniente destacar que los culmos de la *Guadua Angustifolia* son materiales naturales y cualquier variación propia de la constitución de la madera se refleja en los ensayos mostrando alta variabilidad. Sin embargo, tal como se evidencia para los resultados de los módulos de compresión paralela a las fibras, mostrados en esta sección, a pesar de dicha variabilidad, los valores resultan buenos para los diseños de ingeniería. Sin embargo, esta variedad de *Guadua* tiende a mantener su integridad estructural sin presentar un colapso repentino luego de haber desarrollado su resistencia última a las tensiones de compresión. También se observó en algunos ensayos no reportados en este trabajo, que los nudos no aportan resistencia estructural adicional, ya que la resistencia máxima a tensiones a compresión en probetas con nudos, fue un 26% menor a la resistencia obtenida en probetas sin nudos.

Tabla IV: Resultados Módulo de Elasticidad.

Resultados experimentales de ensayos a tensiones de Compresión					
N. culmo	Denominación probeta	Tensión última (kgf/cm ²)	Módulo Elasticidad E (kgf/cm ²)	Carga en el Límite de Proporcionalidad (kgf)	Límite de Proporcionalidad
1	BC01S1	669	757456	12607	144
	BC02S1	546	151558	14941	197
	BC01I1	582	199008	15474	186
	BC02I1	433	165155	2619	31
	BC03I1	607	396524	14037	160
2	BC01S2	531	725746	7512	164
	BC01M2	550	235887	10559	152
	BC01I2	324	587958	9512	72
	BC02I2	276	587958	8292	95
3	BC01S3	329	2679752	10421	93
	BC01M3	379	1248062	4644	45
	BC01I3	385	328072	8848	90
4	BC01S4	291	153807	12738	166
	BC01I4	317	83563	7580	84
5	BC01I5	323	3904868	17085	170
8	BC01S8	361	688800	10114	118
	BC01M8	289	130809	13868	144
	BC01I8	311	119878	9308	94

Fuente: Elaboración propia

3) *Tensión a compresión Vs Deformación Diametral:*

Zona superior:

En la Figura 12 se muestran las curvas tensión-deformación diametral que resultan de los ensayos realizados para la zona superior de los culmos. Para estas deformaciones normales a las fibras dos briquetas, BC01S1 y BC01S2, respondieron según lo esperado, es decir, presentan aumentos lineales de la deformación diametral en la parte media de la probeta a medida que aumenta la carga.

Sin embargo, la probeta BC01S4 muestra un buen inicio con la mayor pendiente de todas las probetas, pero luego ocurre un descenso de dicha pendiente. Por otra parte, la probeta BC01S8 muestra un exceso de deformación comparado con la de las demás probetas que luego parece corregirse y comienza a tomar carga con una pendiente alta para finalmente mostrar un descenso importante de la carga.

Estos dos últimos comportamientos podrían estar asociados con las características de crecimiento, defectos naturales y espesores medios de las secciones transversales para los distintos culmos ensayados.

Zona media:

Al igual que para las probetas de la zona alta, una de las probetas de la zona media, BC01M2, mostró el comportamiento esperado con aumento lineal del diámetro en su sección media a medida que aumenta la carga. Por otra parte, la probeta BC01M8 muestra un cambio brusco en la pendiente de la curva, lo cual, como se ha mencionado anteriormente, posiblemente obedezca a las características de crecimiento, defectos naturales y espesores medios de las secciones transversales para los distintos culmos ensayados.

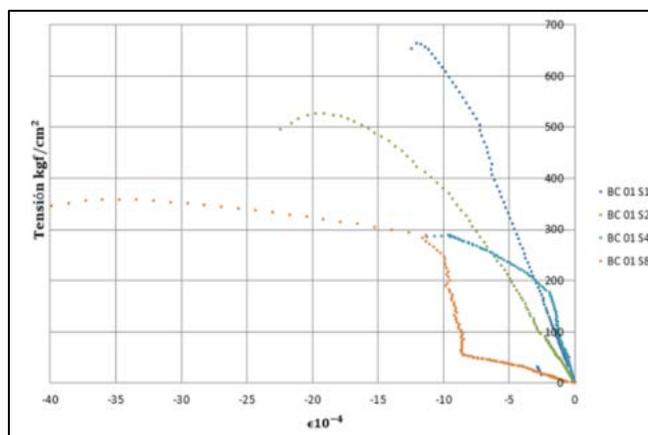


Figura 12: Tensión a Compresión Vs Deformación Diametral; Zona Superior del culmo. Fuente: Elaboración propia

Zona inferior:

Las curvas mostradas en la Figura 14 de la zona inferior, muestran comportamientos similares a los de las Figuras 12 y 13 para las zonas alta y media. Tres probetas, BC0111, BC0311 y BC0118, muestran el comportamiento esperado con deformación diametral lineal, aunque una de ellas, BC0118, deja de tomar carga muy temprano.

Las otras tres probetas, BC0211, BC0212, BC0114, se apartan del comportamiento anterior desde temprano en el ensayo. Es bueno destacar que las desviaciones ocurren para el mismo número de probetas que muestran comportamiento esperado. De nuevo, esto podría ser producto del acomodamiento de las fibras o cualquiera de las otras potenciales acusas antes mencionadas. Recuérdese que este es un material natural y cualquier variación propia de la constitución de la madera se refleja en los ensayos mostrando alta variabilidad. Sin embargo, tal como se evidencia en la sección anterior, a pesar de dicha variabilidad, los valores resultan buenos para los diseños de ingeniería.

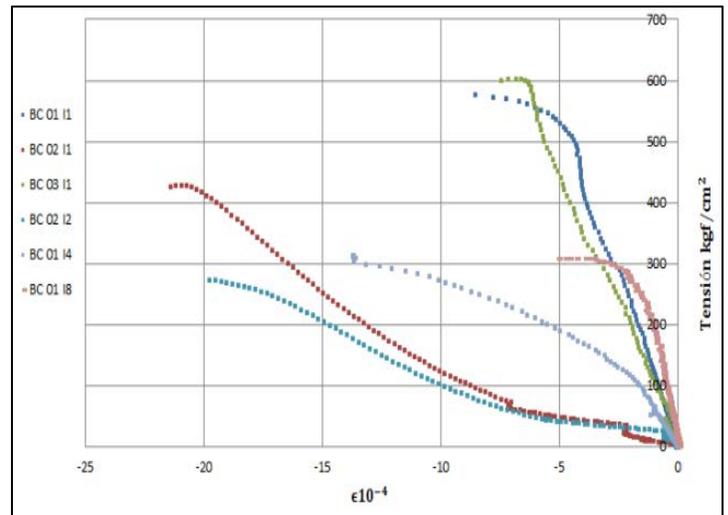


Figura 14: Tensión a Compresión Vs Deformación Diametral; Zona Inferior del culmo. **Fuente:** Elaboración propia

B. Comportamiento mecánico - Tensiones a flexión

En las curvas Tensión-Deflexión mostradas en la Figura 15 se visualiza en general, que el material tiene un patrón de comportamiento similar independientemente de las probetas, debido a la moderada dispersión en las tendencias de los ensayos. Se observa que hay un comportamiento bastante lineal para las pendientes aunque las cargas máximas sí presentan alguna variación.

Al igual que en los casos anteriores, algunas probetas, BF01M2 y BF01M6 tuvieron comportamientos distintos respecto al resto, con tensiones de rotura muy distintas entre ellas. Para el caso de BF01M2, fue el primer ensayo en el cual las fallas ocurrieron por corte en los puntos de apoyo. En el caso de BF01M6, la falla se produjo muy rápidamente, posiblemente por ser la probeta de menor diámetro.

Es bueno destacar que la, BF01M7, fue una probeta que se llevó hasta el colapso, mientras que las demás sólo se llevaron a la falla. Su comportamiento la ubica en el medio de las gráficas de las demás probetas con las mayores deflexiones observadas y respuesta lineal de la carga con la deflexión. Véase la Figura 15.

Es muy importante señalar que al descargar las probetas luego de observar la falla, quedaba una flecha permanente en las mismas que generaba una deformación plástica aproximada del 9%. Sin embargo, en un nuevo ciclo de carga posterior a la falla, se evidenció una gran capacidad de recuperación del material el cual lograba soportar solicitaciones en el

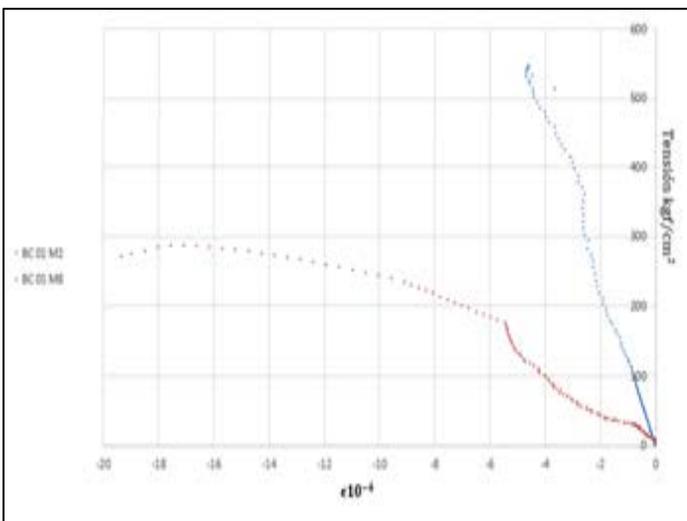


Figura 13: Tensión a Compresión Vs Deformación Diametral; Zona Media del culmo. **Fuente:** Elaboración propia

orden de 88% de la máxima resistida en el primer ciclo de carga. En la Tabla V, a continuación se muestran los resultados de tensión última y módulo de rotura para los ensayos a flexión:

Tabla V: Resultados de ensayos de tensiones a flexión

Resultados experimentales de ensayos a tensiones de Flexión			
Denominación probeta	Tensión última (kgf/cm ²)	Módulo de Rotura E (kgf/cm ²)	Límite de Proporcionalidad
BF01M2	1002	221	165
BF01M3	553	107	71
BF01M4	591	122	86
BF01M5	487	104	81
BF01M6	269	66	40
BF01M7	708	133	41
BF01M8	574	116	84
BF01M9	724	171	70

Fuente: Elaboración propia

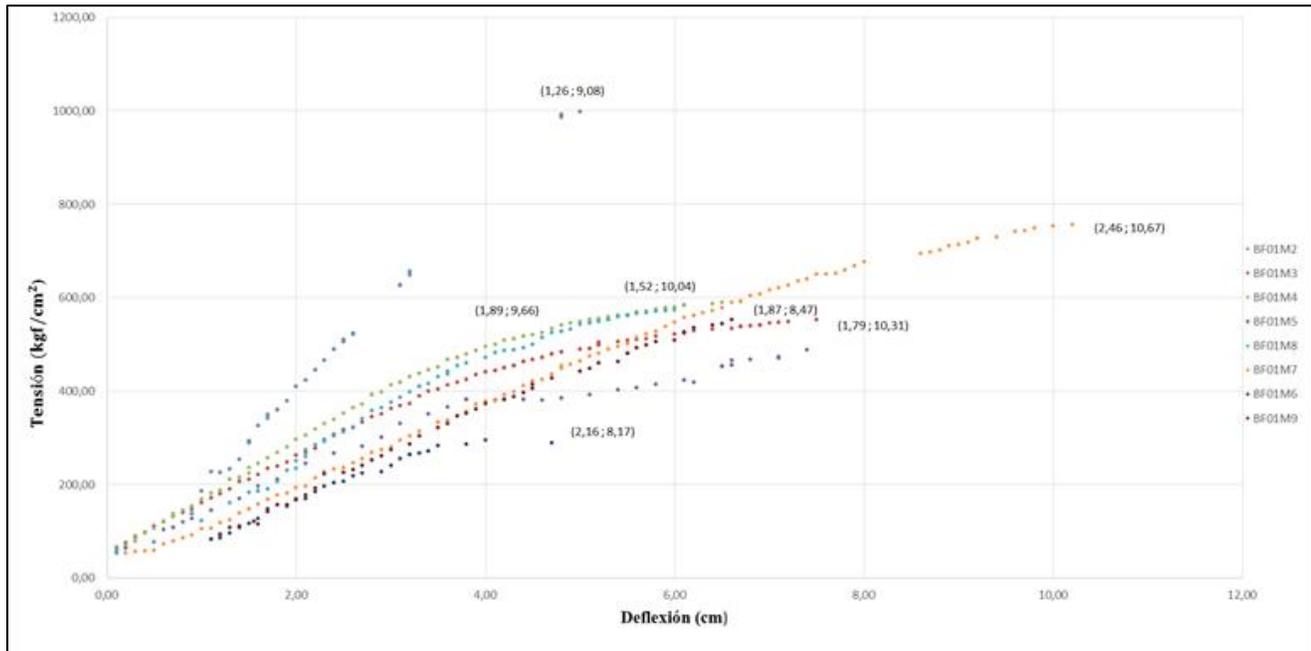


Figura 15: Tensiones a flexión Vs Deflexión. Fuente: Elaboración propia

C. Tipos de Fallas

1) Ensayo tensiones a compresión paralela a la fibra:

En la Figura 16, a continuación, se evidencian los tipos de fallas típicas para el ensayo a tensiones de

compresión paralela a las fibras, las cuales consisten en: aplastamiento en los bordes inferior y/o superior, aplastamientos en el interior o exterior de la probeta. En la Figura 17 se evidencian fallas paralelas a la fibra ocurridas durante los ensayos a compresión.



Figura 16: Falla por aplastamiento (fotos izquierda arriba y abajo), falla por tensión de las fibras externas (arriba a la derecha)

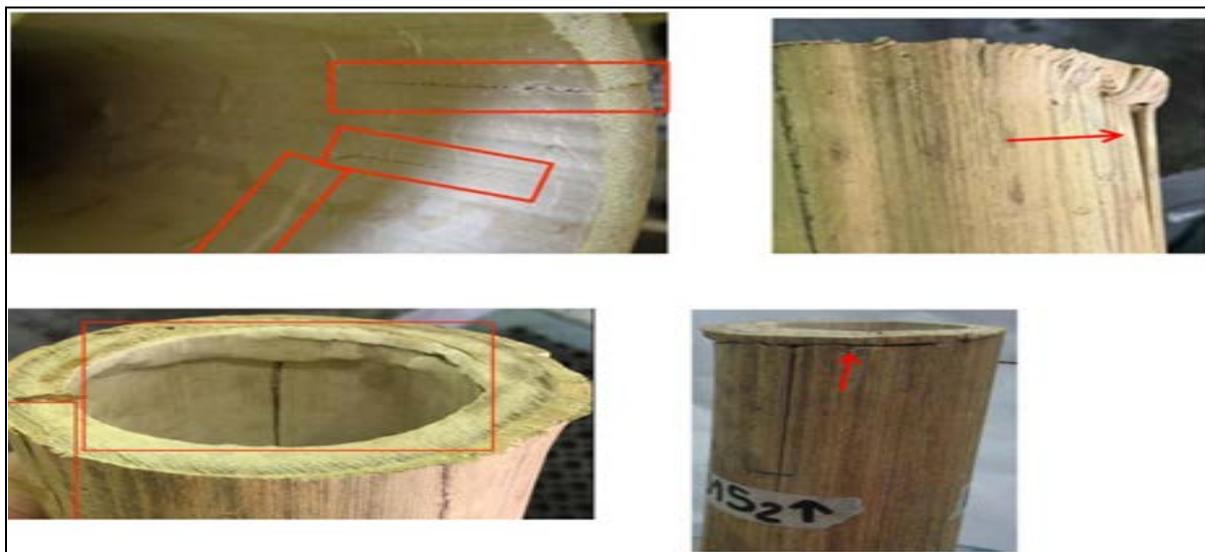


Figura 17: Fallas por fisuras paralelas a las fibras en el borde superior interno (ambas fotos de la izquierda), falla por aplastamiento del borde superior externo (ambas fotos a la derecha)

2) *Ensayo tensiones a flexión:*

La Figura 18 presenta fallas obtenidas durante el ensayo con tensiones a flexión, las cuales consisten en:

Aplastamientos en los puntos de apoyo, fisuras paralelas a las fibras y fallas en las fibras sometidas a compresión por corte y aplastamiento.



Figura 18: Fallas paralelas a las fibras durante los ensayos a flexión (su ubicación en las probetas se indica con flechas)

Algunas de las fallas longitudinales aparecieron por agujeros presentes en las paredes de los culmos causados durante el tratamiento químico o por insectos que atacan la madera. No obstante, también se evidenciaron fallas longitudinales en zonas sanas sin agujeros. En consecuencia, la aparición de grietas longitudinales no depende de la existencia de dichos agujeros y parecen ser parte del comportamiento natural de este tipo de madera al perder la forma redonda de su sección transversal por alguna razón. Esto fue evidenciado, particularmente en los ensayos de flexión en los cuales aparecían grietas en direcciones vertical y horizontal, a medida que la carga aumentaba y la sección original se cambiaba a una elipse.

V. CONCLUSIONES

- Las tensiones máximas a compresión en probetas de *Guadua Angustifolia* Kunth venezolana dependen de la zona del culmo de donde se extrajeron las probetas. A tal efecto, la zona superior posee una capacidad de resistencia a tensiones a compresión paralelas a las fibras mayor que la zona media y que la zona inferior. Las tensiones a compresión para la zona superior tienen una máxima

de 669 kgf/cm² y una media de 454 kgf/cm². Para la zona media la mayor tensión a compresión resultó de 550 kgf/cm² con una media de 406 kgf/cm². Para la zona inferior la máxima tensión fue de 607 kgf/cm² y la media fue de 404 kgf/cm². La tensión media general a compresión fue de 417 kgf/cm².

- Los módulos de elasticidad a la compresión paralela a las fibras se obtuvieron a partir de la pendiente comprendida entre el 10% y el 60% de la tensión última de cada probeta. Al igual que las tensiones máximas a compresión, estos módulos resultaron con una alta dispersión. El valor máximo del módulo a compresión para la zona superior resultó de 757.456 kgf/cm², para la zona media el máximo resultó de 235.887 kgf/cm² y para la zona inferior, el máximo módulo a compresión fue de 3.936.524 kgf/cm². Los valores medios del módulo son: parte alta 859.520 kgf/cm², para la zona media es de 538.253 kgf/cm² y para la zona baja es de 708.109 kgf/cm². El valor promedio general del módulo a compresión es de 730.272 kgf/cm².
- Las curvas tensión-deformación diametral para las tres zonas estudiadas de los culmos muestran respuestas lineales según lo esperado, al igual que

desviaciones respecto a dicho comportamiento. Es bueno destacar que las desviaciones ocurren para el mismo número de probetas que muestran comportamiento esperado. Esas desviaciones del comportamiento esperado podrían estar asociadas con las características de crecimiento, defectos naturales y espesores medios de las secciones transversales para los distintos culmos ensayados.

- Las fallas características del material al ser sometido a tensiones a compresión paralelas a las fibras comprenden fallas locales con gran capacidad de deformación previa a la rotura por aplastamiento en las caras de las probetas y grietas longitudinales en el exterior e interior de las mismas. Además, esta variedad de *Guadua* tiende a mantener su integridad estructural sin presentar un colapso repentino luego de haber desarrollado su capacidad de resistencia última de tensiones a compresión. También se observó en datos no incluidos en este trabajo que aparentemente los nudos no aportan resistencia estructural adicional, ya que la resistencia máxima a tensiones a compresión en probetas con nudos, fue un 26% menor a la resistencia obtenida en probetas sin nudos.
- El gráfico entre la tensión última y los espesores efectivos indica que a medida que aumenta dicho espesor efectivo aumentan las tensiones últimas tomadas por las probetas. Esto sugiere que es conveniente utilizar este espesor efectivo para definir las capacidades de las secciones transversales de los culmos.
- La presencia de agujeros en las paredes de los culmos realizados durante el proceso de inmunización y/o perforaciones hechas por insectos, antes del inmunizado, fomenta la aparición de grietas longitudinales y fallas locales por aplastamiento durante la aplicación de la carga axial del ensayo a tensiones de compresión. No obstante, algunas de las fallas longitudinales aparecieron en zonas sanas sin agujeros. En consecuencia, la aparición de grietas longitudinales no depende de la existencia de dichos agujeros y parecen ser parte del comportamiento natural de este tipo de madera al perder la forma redonda de su sección transversal por alguna razón. Esto fue evidenciado, particularmente en los ensayos de flexión en los cuales aparecían grietas en direcciones vertical y horizontal, a medida que la carga aumentaba y la sección original se cambiaba a una elipse.
- Las fallas observadas en los ensayos de tensiones a flexión se desarrollaron en su totalidad

en las fibras que se encontraban a compresión, este comportamiento corrobora la hipótesis de que la capacidad de resistencia del material a tensiones a tracción es mayor que a tensiones a compresión, aunque no fue posible establecer las máximas tensiones de tracción por razones de limitaciones de espacio durante los ensayos.

- Al descargar las probetas luego de haberlas llevado a la falla, quedaba una flecha permanente en las mismas que generaba una deformación remanente aproximada del 9%. Sin embargo, en un nuevo ciclo de carga posterior a la falla, se evidenció que las mismas lograban soportar solicitaciones en el orden de 88% de la máxima resistida en el primer ciclo de carga.

VI. RECOMENDACIONES

- Para la realización de futuros ensayos de tensiones a compresión paralela a las fibras y flexión perpendiculares a la misma, incrementar la población de probetas para poder emplear análisis estadísticos más exhaustivos.
- Realizar ensayos de tensiones a compresión paralela a la fibra y flexión, variando la velocidad de aplicación de la carga, con el fin de determinar si existe alguna variación en el módulo de elasticidad y capacidad de resistencia última.
- Realizar estudios de ensayos de fatiga.
- Para la realización de ensayos de tensiones a compresión, se recomienda efectuar un estudio en el cual se estandaricen los diámetros, retirando el material más interno, para evaluar directamente las propiedades de la sección externa.
- Se recomienda la realización del proceso de inmunizado mediante otro tipo de ejecución, evitando la perforación de los culmos.
- Se considera apropiado evaluar las propiedades mecánicas en diferentes variedades de *Guadua*.

REFERENCIAS

- [1] Echezuría H., (2018). El Bambú como Recurso Sustentable para Construcción de Viviendas de Bajo Costo. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJmM7MopDeAhVKrikKHc_4BG_oQFjAGegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Frevistasenlinea.saber.ucab.edu.ve%2Ftemas%2Findex.php%2Ftekhne%2Farticle%2Fdownload%2F3673%2F3150&usg=AOvVaw3WOFn1qGx13Qlh7m0KLpzs

- [2] NTC 5525:2007. “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth”
- [3] IS 6874:2008. “Indian Standard Method of test for Bamboo (First Revision)”.
- [4] Londoño X., Camayo G. C., Riaño N. M. and López Y., (2002). Characterization of the anatomy of guadua angustifolia (Poaceae: Bambusoidae) culms Bamboo Science and Culture. Recuperado de: The Journal of the American Bamboo Society.
- [5] Zhou, A., Bian, Y., Shen, Y., Huan, D. H., & Zhou, M. (2018). Inelastic Bending Performances of Laminated Bamboo Beams: Experimental Investigation and Analytical Study. BioResources.
.Obtenido de
http://stargate.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_13_1_131_Zhou_Inelastic_Bending_Performances_Laminated_Bamboo