

Determinación de las propiedades geométricas y mecánicas de compresión y tracción de la especie *Phyllostachys aurea* del Ecuador

Determination of the geometric and compressive and tensile mechanical properties of the species *Phyllostachys aurea* from Ecuador

Recibido: mayo 11 de 2022 | Revisado: julio 07 de 2022 | Aceptado: octubre 10 de 2022

DANIELA CADENA¹

PABLO JÁCOME²

PEDRO CÓRDOVA³

RESUMEN

Su elevado rendimiento mecánico junto con su baja huella de carbono permite al bambú la posibilidad de sustituir materiales de construcción convencionales en diversas aplicaciones. En la actualidad hay que considerar que existen países que todavía no cuentan con el suficiente conocimiento sobre las características estructurales de diferentes bambúes cultivados localmente. En este sentido, esta investigación presenta los resultados que determinan las propiedades geométricas y mecánicas a la compresión y tracción paralela a la fibra de la especie *Phyllostachys aurea* de la Amazonía ecuatoriana. Las muestras ensayadas pudieron registrar que la resistencia a la compresión paralela a la fibra presentó una mínima desviación estándar en los resultados, mostrando una resistencia promedio de 52.4 MPa. Tras un análisis estadístico de estos valores, se observó una distribución normal entre ellos, lo que incrementa su confiabilidad. En cambio, la resistencia a la tracción paralela a la fibra, evidenció una alta desviación estándar en los resultados, debido a la dificultad para elaborar las probetas requeridas según lo establecido en la norma ISO/ FDIS - 22157 (2019). Sin embargo, la resistencia promedio de este parámetro fue de 90.2 MPa, para confirmar que es un bambú con gran potencial frente a este tipo de carga. En este sentido, se elaboró una comparación entre la resistencia a compresión y tracción de la especie *Phyllostachys aurea* con otros materiales convencionales usados en construcción como el hormigón, acero estructural y el bambú *Guadua angustifolia* Kunth.

Palabras clave: *Phyllostachys aurea*, propiedades geométricas, propiedades mecánicas

ABSTRACT

Its appropriate mechanical behavior and its low carbon footprint allow bamboo to replace conventional construction materials in various applications. Currently, it should be considered that there are countries that still do not have sufficient knowledge about the structural characteristics of locally grown bamboos. In this sense, this research presents the results for the determination of the geometric properties and the compressive and tensile mechanical properties parallel to the fiber of the species *Phyllostachys aurea* from the Ecuadorian Amazon. With the samples tested, the compressive strength parallel to the fiber presented a minimum standard deviation in the results, showing an average strength of 52.4 MPa. After a statistical analysis of these values, a normal distribution was observed between them, increasing their reliability; the tensile strength parallel to the fiber showed a high standard deviation in the results, due to the difficulty in preparing the required sample as established in the standard ISO/ FDIS - 22157 (2019). However, the

1 Universidad Central de Ecuador, Quito-Ecuador

2 Organización Internacional del Bambú y Ratán, Quito - Ecuador

3 Andritz, Vancouver, Canadá
Autor de correspondencia:
rchuquicondor@unfv.edu.pe

Autor de correspondencia:
dcdadena@uce.edu.ec

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n34.07>

average resistance of this parameter was 90.2 MPa, confirming that it is a bamboo with great potential against this type of load. Therefore, a comparison was made between the compressive and tensile strength of the *Phyllostachys aurea* species with other conventional materials used in construction such as reinforced concrete, structural steel and *Guadua angustifolia* Kunth bamboo.

Keywords: *Phyllostachys aurea*, geometric properties, mechanical properties

Introducción

El aumento poblacional y la rápida urbanización multiplican la tasa de desarrollo de infraestructuras y equipamientos en todo el mundo, haciendo que la industria de la construcción sea uno de los sectores de más rápido crecimiento, y que eso a su vez conlleve a la dependencia (en gran medida) de muchos recursos naturales. Conocemos que la mayoría de materias primas convencionales que se emplean en la construcción, cargan consigo algún grado de impacto ambiental. Algunos materiales son procesados a partir de minerales con baja regulación y su fabricación puede traer efectos adversos, como la emisión de contaminantes a la atmósfera y a los acuíferos, el requerimiento de un alto consumo energético durante su producción (Boustead y Hancock, 1979), y de manera colateral la destrucción de hábitats naturales. Según estudios de González y Navarro (2006), la adecuada selección de materiales de construcción, permite disminuir hasta un 30% las emisiones de CO₂, lo que influye, directamente, en la sostenibilidad y desarrollo de un entorno construido más saludable.

Un material no convencional que ha ido ganando terreno en el sector de la construcción es el bambú, no solo por ser un recurso renovable, que reduce la

contaminación y los residuos generados en la construcción civil, sino que además, brinda seguridad por su capacidad sismorresistente, al combinar ligereza, flexibilidad y resistencia. (Pereira y Beraldo, 2007). Sin embargo, algunas especies de bambú carecen de literatura profunda acerca de su aplicación como material estructural, aún contando el esfuerzo que vienen realizando algunos países para un desarrollo innovador de este recurso. En ese sentido, Ecuador posee un registro de cinco géneros y 47 especies nativas de bambúes. (INBAR, 2018). No obstante, solo dos especies como la *Guadua angustifolia* Kunth y *Dendrocalamus Asper* han sido impulsadas en el sector de la construcción, al estar incluidas dentro del capítulo Estructuras de Guadua de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción. (MIDUVI, 2017), la cual recoge investigaciones realizadas en el país, así como experiencias constructivas de Colombia y Perú; mientras que a la *Phyllostachys aurea*, especie introducida en Ecuador en 1923 (Añazco, 2015), se la ha limitado a la manufactura de mobiliario y elementos decorativos, debido sobre todo a la insuficiente evaluación de su potencial; mientras que países como Argentina y Brasil la emplean en la construcción de estructuras (Cadena, Desscamps y Laplume, 2018).

De la revisión bibliográfica se encontraron algunos estudios de

caracterización de especies de bambú, como los de Liu et al. (2022) con el *Phyllostachys edulis*, Gomes Neto et al. (2021) con la *Bambusa Vulgaris*, Garcia et al. (2019) con la *Guadua angustifolia* Kunth, Srivar y Jakranod (2016) con el *Dendrocalamus asper* Backer, entre otros. Sin embargo, existe poca información y estudio sobre las propiedades del *Phyllostachys aurea*.

La utilización de nuevos materiales que tengan como propósito un trabajo estructural, exige una comprensión clara de sus propiedades mecánicas, con el fin de aprovechar al máximo sus capacidades. Con estos antecedentes, la razón de este estudio, es contribuir en la caracterización geométrica y mecánica a compresión y tracción de la especie *Phyllostachys aurea*, para determinar su comportamiento estructural y como puede ser empleada en la construcción civil. Un aspecto importante en las propiedades mecánicas de materiales naturales es su variabilidad. Los resultados de ensayos de materiales como el bambú o la madera generalmente muestran un amplio rango de resistencias, lo que demuestra la dependencia de la fibra en su punto más débil o falla en la lignina que une las fibras, lo que significa que su área crítica controlará su resistencia. Este tipo de variación es típico en los materiales naturales que contienen distribuciones heterogéneas de su composición a lo largo de su longitud.

Por lo tanto, la probabilidad de encontrar un punto débil en una de las fibras se incrementa en la parte del ensayo, cuando la longitud de la muestra es mayor. La resistencia de las muestras de bambú está limitada a los defectos que varían a lo largo de su longitud. A compresión, por lo general la falla se da por la separación

de las fibras, cuando la lignina no es capaz de seguir manteniéndolas juntas. Mientras que a tracción, las fibras pueden fallar en cualquier punto débil a lo largo de su longitud. La resistencia promedio de ensayos de compresión es más homogénea que la resistencia promedio de ensayos a tracción. Por lo tanto, la resistencia de la fibra no es un valor único específico, sino que varía de una fibra a otra, y depende de la longitud en la cual es medida.

El objetivo de este trabajo fue obtener medidas de la resistencia a la compresión y tracción paralela a las fibras. Las variables que se midieron fueron: resistencia a compresión (esfuerzo axial) paralela a la fibra, módulo de elasticidad a la compresión, resistencia a la tracción (esfuerzo axial) paralela a la fibra, módulo de elasticidad de la tracción. Los valores característicos de la resistencia se calcularon como percentiles de resistencia menor al 5%. Teniendo en cuenta el número de muestras, se hizo referencia a la teoría de pequeñas muestras, mediante la estimación de la media y de la varianza.

Método

Dentro de las propiedades geométricas evaluadas en este estudio, se tomaron en consideración el diámetro exterior y el espesor de la pared del bambú al ser variables importantes para medir el área de la sección transversal del elemento que por lo tanto tienen una influencia directa en su resistencia. La medición de la rectitud de este bambú es importante porque un elemento sometido a compresión puede sufrir efectos de segundo orden en su resistencia debido a la desviación entre sus extremos y el centro del elemento.

Los cincuenta culmos de la especie de bambú *Phyllostachys aurea* (André) Rivière & C. Rivière (Londoño, 2021) utilizados en la investigación fueron recolectados aleatoriamente de un bosque nativo ubicado en la comuna de Wawa-Sumaco, provincia del Napo (amazonía del país). Se seleccionaron tallos de una edad estimada de cuatro años, con un

diámetro promedio de 3,5 centímetros y una altura de cinco metros. Para su extracción, los tallos fueron cortados a una altura aproximada de 20 centímetros sobre el nivel del suelo, para luego ser ordenados y así permitir la identificación basal de los culmos, y su enumeración y codificación, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

- (a) Selección de culmos a partir de su edad, y medición de su diámetro exterior
(b) Codificación de culmos



(a)



(b)

Los tallos que se transportaron al sitio de prueba, previa selección, fueron redimensionados según los requerimientos correspondientes a las pruebas mecánicas. En la Figura 2 se muestra como fueron apilados, de manera que pudieron ser ventilados y

almacenados en un lugar seco, protegidos del sol y la lluvia (Liu et al., 2021), sin contacto con el suelo, hasta alcanzar un grado de humedad cercano al 12%, según lo recomendado por ISO/ FDIS - 22157 (2019).

Figura 2

(a) *Apilamiento de tallos de bambú*, (b) *Registro del grado de humedad*



(a)



(b)

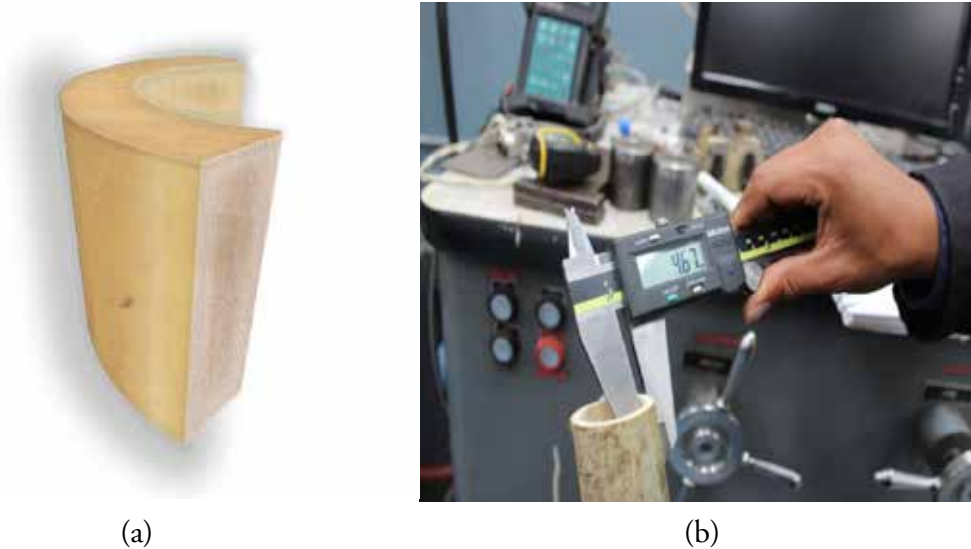
Las pruebas fueron desarrolladas en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiente de la Escuela Politécnica Nacional. Para realizar dichos ensayos, se utilizó una máquina electromecánica marca Controls, modelo 70-S18B2, con una capacidad de carga de 200 kN, conectada a una computadora que registra los datos de carga, tiempo y desplazamiento usando un software PA/MPC-5. Según la ISO/ FDIS - 22157 (2019), el número mínimo de muestras para los ensayos debe ser igual a 12 por especie, por prueba y por categoría. Como varían las propiedades del bambú a lo largo de su longitud útil, los culmos se dividieron en tres categorías: Inferior (I), Media (M) y Superior (S).

Propiedades geométricas

Bajo los parámetros de la normativa, el procedimiento para medir el diámetro externo y el espesor de pared de cada muestra, se realizó con un calibrador digital con precisión de 1 mm. Como la sección transversal del bambú no es circular, se tomaron dos puntos opuestos en cada cara exterior, totalizando cuatro mediciones para determinar así su diámetro; mientras que para el espesor de pared, se midieron cuatro puntos del grosor en la parte superior e inferior, totalizando ocho mediciones (Figura 3). Con el promedio de todos estos valores se pudo obtener el cálculo de la sección transversal de cada muestra.

Figura 3

- (a) Representación gráfica de la pared del bambú
 (b) Registro de medidas para espesor de pared



La relación entre las propiedades geométricas y los resultados de la resistencia a la compresión paralela a la fibra fue valorada a través de diferentes comparaciones: la relación directa que tiene el espesor de la pared del bambú (t_w), el diámetro exterior del bambú (D_{ext}), la proporción (ratio) del espesor dividido para el diámetro exterior (t_w/D_{ext}), y el diámetro medio del bambú en la resistencia a la compresión paralela a la fibra.

El valor característico de cada propiedad y relación geométrica fue calculado de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 7.2.1 de la norma ISO 22156 (2004). Bajo esta norma, los valores característicos de cada propiedad del bambú se calculan con la ecuación (1) descrita en este documento. Esta ecuación asegura un nivel de confianza del 75% de que los resultados representan a la población con un 95% de probabilidad de que este valor sea excedido.

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

Así:

R_k es el valor característico

$R_{0.05}$ es el 5% de la población

m es el valor promedio de la población

s es la desviación estándar

n es el número de muestras

Ensayo de tracción paralela a la fibra

Para la disposición de los especímenes de *Phyllostachys aurea* sometidos al ensayo de tracción, se siguieron las indicaciones determinadas en la norma ISO/FDIS - 22157 (2019). Se prepararon cuidadosamente 36 muestras extraídas de cada culmo, las cuales fueron divididas en tres categorías: inferior, media y superior (Figura 4), de donde se obtuvieron 12 ejemplares con nudo de cada una ellas. Las muestras fueron montadas en la máquina de ensayos, asegurando que se encontraran alineadas axialmente en la

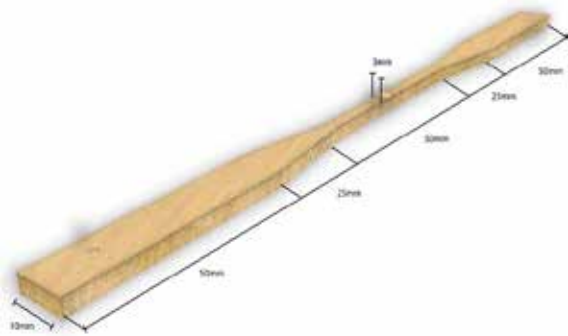
dirección de la fuerza de tracción, y aparte se colocaron dos galgas extensiométricas

en algunas de las muestras ensayadas para medir sus deformaciones.

Figura 4

(a) Representación gráfica de una muestra de *Phyllostachys aurea* para ensayo de tracción ISO/ TR 22157 - 2 (2014),

(b) Muestras con nudo extraídas de tres categorías en culmos



(a)



(b)

La resistencia a la tracción es obtenida del radio de la fuerza máxima aplicada sobre la sección transversal del plano perpendicular a la muestra. Donde F es la fuerza máxima en la que la muestra falla, y Ag es el área de la sección transversal del plano de falla.

$$\sigma = \frac{F}{Ag}$$

El módulo de elasticidad de la fibra fue calculado de acuerdo al procedimiento contemplado en la norma. Para cada ensayo se elaboraron curvas de esfuerzo versus deformación unitaria. De las curvas, la pendiente de la región lineal elástica fue obtenida. Donde, ϵ es deformación unitaria, Δl es el desplazamiento resultado de la elongación de la fibra registrada por la máquina, l_0 es la longitud inicial libre entre los extremos, y Et es el módulo de elasticidad.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\sigma = (Et)(\epsilon)$$

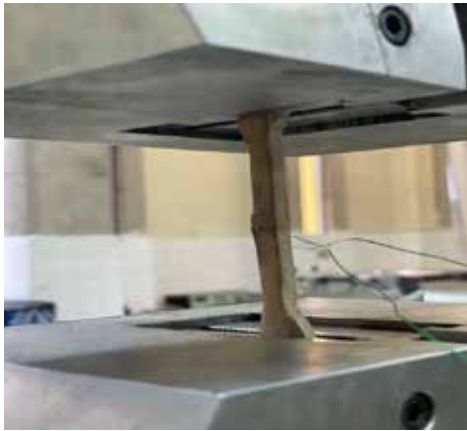
$$Et = \frac{(F) (l_0)}{(Ag) (\Delta l)}$$

$$Et = \frac{(F_{60} - F_{20})}{(Ag)(\epsilon_{60} - \epsilon_{20})}$$

A través de una celda de carga se obtienen las lecturas de la fuerza que se va aplicando a la muestra, y las lecturas de la deformación correspondiente a esa carga. Ambos extremos de cada muestra se sujetan con abrazaderas para poder aplicar la carga de tracción con la máquina de ensayos. Se asignan cargas sucesivamente hasta llegar a la falla de rotura por tracción. Como se tenía previsto, todas las muestras fallaron en la sección de medición, además de que fueron fallas por fragilidad, es decir, instantáneas, las fibras se rompían bruscamente. En la Figura 5 se puede apreciar el mecanismo de falla de la muestra TN 011 I, después de la ejecución de un ensayo de tracción paralela a la fibra.

Figura 5

- (a) *Ensayo a tracción en la muestra con galgas extensiométricas*
- (b) *Fallas de las muestras bajo ensayo a tracción*



(a)



(b)

Ensayo de compresión paralela a la fibra

Para la preparación de los ejemplares de *Phyllostachys aurea* sometidos al ensayo de compresión, se siguieron las indicaciones determinadas en la norma ISO/ FDIS - 22157 (2019). Las muestras cilíndricas fueron preparadas de tal manera que sus caras transversales sean paralelas entre sí y que la pared (del bambú) estuviera totalmente perpendicular a estas. Para el caso de muestras con nudos, el ensayo

se realizó garantizando que el nudo se encontrara en el centro de la longitud del ejemplar (Wakchaure y Kute, 2012). El área de la sección transversal fue definida para cada muestra previa al ensayo. Las dimensiones de los ejemplares fueron calculadas con una precisión de 1 mm. Se analizaron un total de 72 muestras con nudo / sin nudo, con un grado de humedad aproximado del 10%. Además, se colocaron dos galgas extensiométricas en algunas de las muestras del ensayo para medir sus deformaciones.

Figura 6

- (a) *Representación gráfica de la muestra para ensayo de compresión ISO/ TR 22157 - 2 (2014)*
- (b) *Muestras extraídas de *Phyllostachys aurea* con nudo de tres categorías en culmos*



(a)



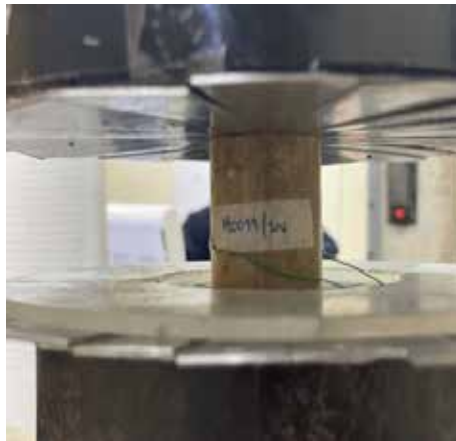
(b)

Se registraron las cargas máximas aplicadas hasta que los especímenes no pudieron resistir más fuerza. La máquina para ensayos de compresión fue adaptada de acuerdo a las indicaciones establecidas por la norma. Entre las placas sólidas se colocaron soportes de acero de 4 mm de

espesor y una capa intermedia de parafina y neopreno, para que se distribuyeran uniformemente las cargas de compresión en la pared del bambú, y no se diera el efecto de confinamiento que podría aumentar la resistencia real y arrojar resultados erróneos muy altos.

Figura 7

- (a) *Ensayo a tracción en la muestra con galgas extensiométricas*
(b) *Fallas de las muestras bajo ensayo a tracción*



(a)



(b)

El ensayo consiste en colocar la muestra en la máquina, con la pared del bambú perpendicular a las placas de la máquina de ensayos, de manera que los ejes longitudinales y transversales del ejemplar queden alineados con los de las placas de la máquina. Se aplican fuerzas de compresión a los extremos de las muestras, perpendiculares a sus caras a través de las placas sólidas.

Para la obtención de los valores de la resistencia última de compresión en N/mm^2 , se debe tomar en cuenta el *Fult*, que es la carga máxima en newtons en la cual falla la muestra y *A* como el área en milímetros cuadrados de la sección transversal.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Resultados y Discusión

Efecto en los ensayos de la tracción paralela a la fibra versus la influencia de las propiedades geométricas

La Tabla 1 muestra el análisis descriptivo realizado a las 36 muestras sometidas a ensayo para calcular el esfuerzo de tracción última paralelo a la fibra. La resistencia última promedio fue de 90,21 MPa. El valor característico de resistencia a la tracción es 34,1 MPa, definido bajo el uso de la ecuación que contiene la norma ISO 22156 (2004). La desviación estándar es muy alta, 32.3 MPa, comparándola a la media, lo que demuestra que hay muchos valores altos y bajos alejados de la media. El valor característico es muy inferior al valor del percentil del 5%, 40,65 MPa,

debido a que los resultados son muy dispersos. Finalmente, el valor admisible de diseño, 5.68 MPa, fue determinado usando factores de seguridad, reducción

de calidad, y duración de la carga, encontrados en la Tabla 7 de la NEC-SE-GUADUA (2017).

Tabla 1

Análisis estadístico de las 36 muestras del ensayo para probar la tracción paralela a las fibras

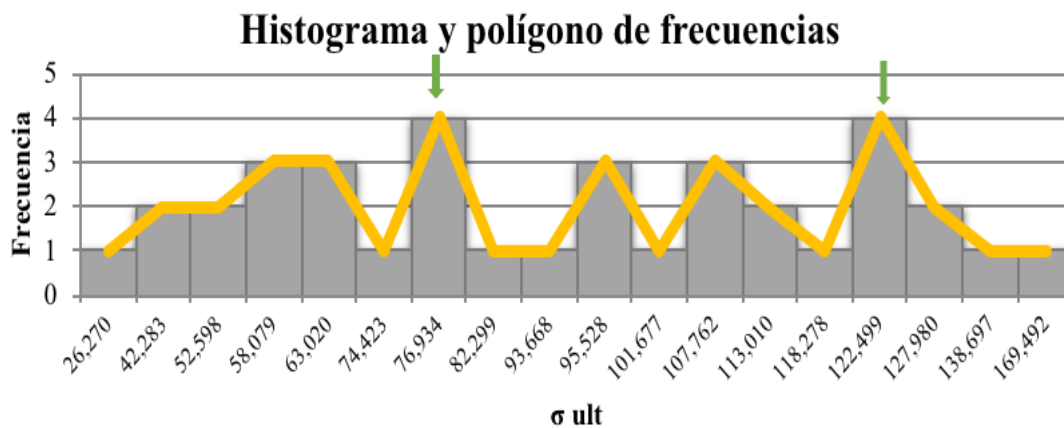
Item	Valoración Tracción paralela a las fibras		
1	N° de muestras ensayadas	36	u
2	σ_{ult} Media	90,21	MPa
3	Desviación estándar (S)	32,30	MPa
4	Valor característico (mk)	34,10	MPa
5	Porcentaje (5%)	1,8	
6	σ porcentaje 5%	40,65	MPa
7	σ_{adm}	5,68	MPa

En la Figura 8 se ilustra la distribución de frecuencias de la resistencia última a tracción paralela a la fibra de los ensayos efectuados a los 36 ejemplares. Los resultados de las muestras fueron agrupados en 18 intervalos de acuerdo al valor de la resistencia última a la tracción, calculando el valor promedio entre las muestras que descendieron en cada intervalo. El alto número de agrupaciones fue debido a que, al agrupar resultados con valor medio similar, se evidenció que hay una cantidad grande

de valores distribuidos en ambos lados del histograma, con un valor mínimo de 26,27 MPa, y un valor máximo de 169,49 MPa. Se considera que los resultados cuentan con una distribución bimodal, porque existen dos valores (76,93 MPa y 122,5 Mpa) que tienen la misma frecuencia. Los resultados a tracción paralela a la fibra se encuentran muy dispersos y se alejan de la media, 90,21 MPa, y la mediana, 93,67 Mpa, por ser un material no industrializado, sin ningún tipo de intervención tecnológica.

Figura 8

Histograma y polígono de frecuencias de los resultados del esfuerzo último a tracción paralela a la fibra



La Tabla 2 presenta los resultados según las variables usadas para el cálculo del valor del módulo de elasticidad (E) en tres ensayos de tracción paralela a la fibra. El valor medio es de 26481.65 MPa y la

desviación estándar es 8132.65 MPa. Al usar estos valores para el cálculo del valor característico del módulo de elasticidad (E), se determinó un resultado de 10810.1 MPa.

Tabla 2

Resultados del módulo de elasticidad de tracción paralela a la fibra

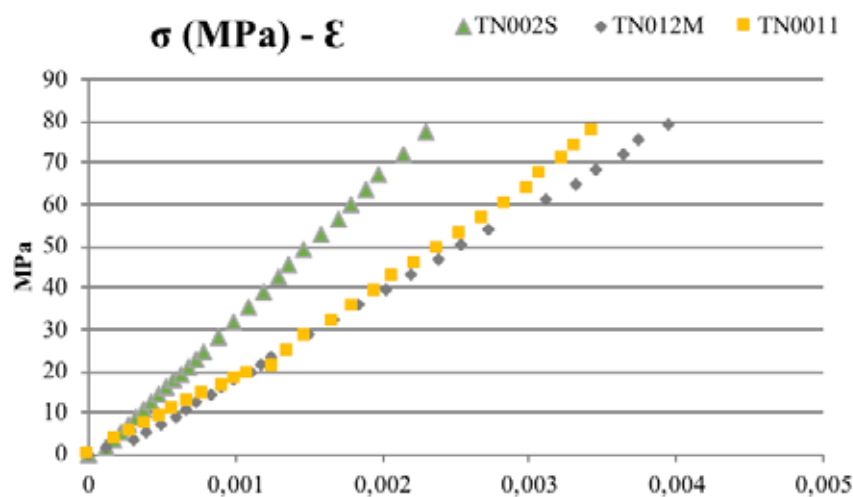
Muestra	TN001I		TN012M		TN002S	
σ_{ult}	77,6	MPa	79,28	MPa	77,6	MPa
0,6 σ_{ult}	45,86	MPa	46,85	MPa	45,86	MPa
0,2 σ_{ult}	15,87	MPa	16,22	MPa	15,87	MPa
ϵ_{60}	0,0022		0,0024		0,0014	
ϵ_{20}	0,0009		0,0009		0,0005	
E	22919,37	MPa	20737,98	MPa	35787,59	MPa

La Figura 9 muestra tres curvas esfuerzo versus deformación unitaria (σ vs. ϵ) de las muestras TN002S, TN12M, y TN001I, en las que se puede apreciar que la muestra TN002S tuvo un valor del módulo de elasticidad más alto debido a que la pendiente de la curva es elevada. Las muestras TN012M y TB001I tuvieron casi las mismas pendientes de la curva, es decir módulos

de elasticidad muy semejantes, lo que indica que para valores similares de carga, sufrieron deformaciones unitarias con valores parecidos. Se puede observar en las curvas que el módulo de elasticidad a lo largo de todo el ensayo es constante, porque la pendiente de la curva sigue un patrón de línea ascendente sin cambiar su dirección hasta que ocurre la falla.

Figura 9

Curvas σ - ϵ de muestras de ensayo tracción paralela a la fibra



Las Figuras 10 y 11 evidencian la influencia que tiene el espesor de la pared del bambú en la resistencia a la tracción

paralela a la fibra. Se puede observar que la resistencia de la tracción es directamente proporcional al espesor de la pared del

bambú, pues a mayor espesor, mayor es el esfuerzo último aplicado a la muestra o mayor es la carga última que causa la falla en las muestras. De igual manera, mientras menor sea el espesor, menor será la carga necesaria para causar falla a

tracción en la pared del bambú. Esto se debe a que con menos espesor es más fácil que falle la fibra más débil, o también por la presencia de algún defecto (corte transversal) en la pared del bambú.

Figura 10

Variación del esfuerzo último a la tracción paralela a la fibra con el espesor de la pared de la muestra

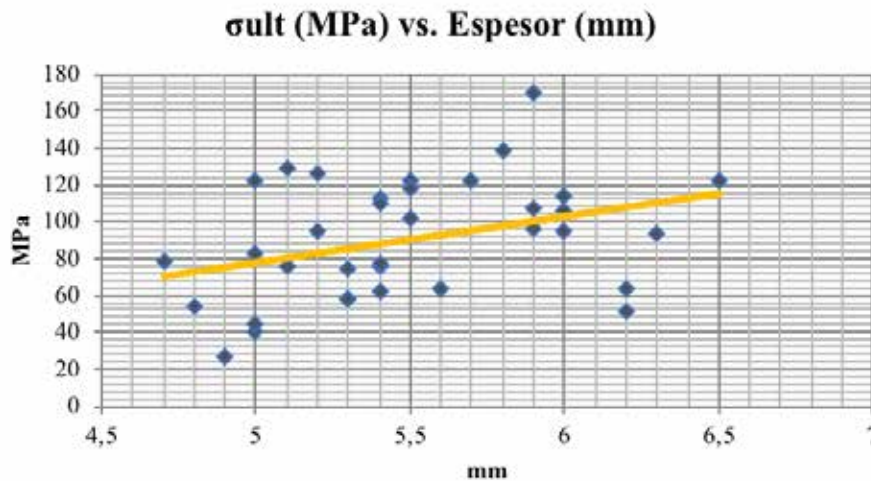
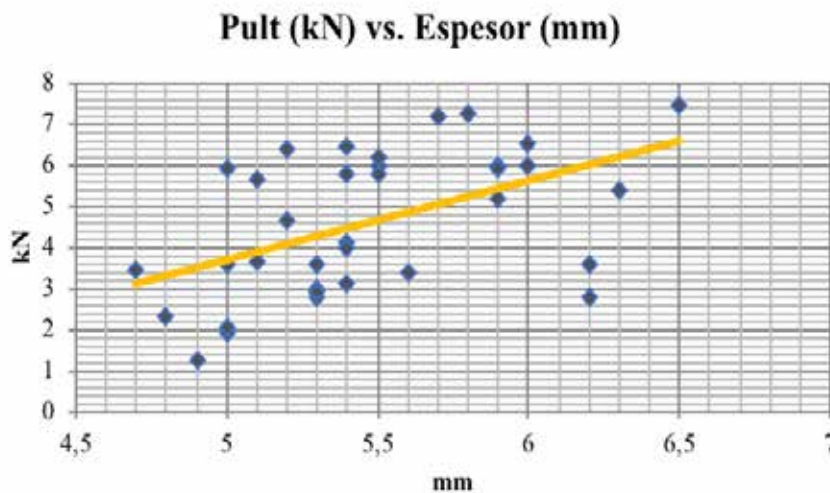


Figura 11

Variación de la carga última de falla a la tracción paralela a la fibra con el espesor de la pared de la muestra



Efecto en los ensayos de compresión paralela a la fibra versus la influencia de las propiedades geométricas

En la Tabla 3, se muestra el análisis de los resultados de 72 ensayos de

compresión paralela a la fibra, los cuales han determinado una resistencia última a la compresión igual a 52.45 MPa. La desviación estándar de los resultados es de 6.285 MPa, un valor bajo en relación al resultado medio. El valor característico

de la resistencia a la compresión paralela a la fibra, fue calculado mediante el procedimiento de la norma ISO 22156 (2004), con un resultado de 38.04 MPa, que es menor al valor del percentil del 5% de 39.55 MPa, lo cual asegura que el valor característico, sea menor que la

resistencia de las muestras sometidas a compresión en un 95% de las veces, con una confianza del 75%. El valor admisible de diseño de la resistencia a la compresión paralela a la fibra resultó ser de 21.14 MPa.

Tabla 3

Análisis descriptivo de las 72 muestras del ensayo a compresión paralela a la fibra

Ítem	Valoración Compresión paralela a las fibras		
1	N° de probetas ensayadas	72	u
2	σ_{ult} Media	52,454	MPa
3	Desviación estándar (S)	6,285	MPa
4	Valor característico (m_k)	38,044	MPa
5	Porcentaje (5%)	3,6	
6	σ porcentaje 5%	39,552	MPa
7	σ_{adm}	21,136	MPa

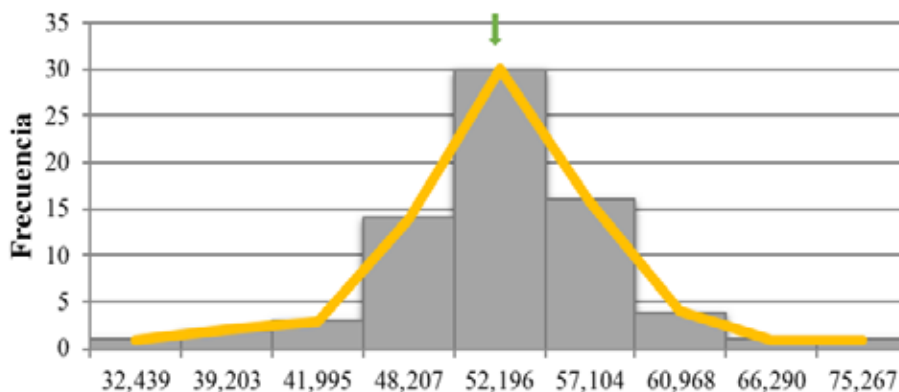
La Figura 12 muestra el histograma y el polígono de frecuencias de los resultados de las 72 muestras. Se usaron nueve grupos para presentar los resultados con valores similares de resistencia última a la compresión. La simetría del gráfico muestra que la distribución de los

resultados es normal con una sola moda, 52.2 MPa, por lo que es una distribución unimodal. El promedio de la población de 72 muestras es 52.33 MPa, resultado muy semejante a la moda y a la media, lo que confirma que se obtuvo una distribución simétrica.

Figura 12

Histograma y polígono de frecuencias de los resultados de compresión paralela a la fibra

Histograma y Polígono de frecuencias



Se obtuvo las curvas esfuerzo versus deformación unitaria, de tres muestras sometidas a compresión paralela a la

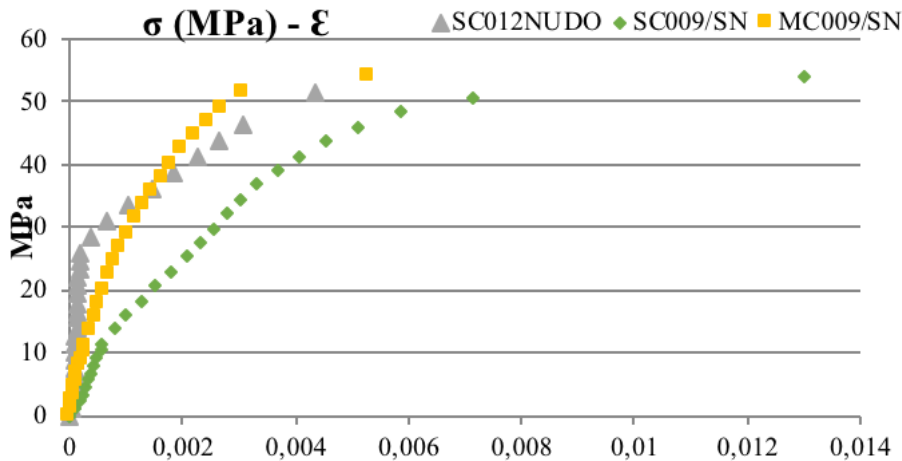
fibra; de estas curvas se concluye que las muestras de bambú tuvieron un comportamiento elástico. A medida que

se iba comprimiendo y deformando, la resistencia a la compresión aumentaba. Se puede observar una pendiente constante durante el primer tramo de la curva, lo que indica que a bajas cargas la muestra

sufría bajas deformaciones, hasta que la muestra llega a un punto de inflexión en el cual las deformaciones se incrementan, incluso con poco aumento de carga.

Figura 13

Curvas esfuerzo versus Deformación unitaria de ensayos de compresión paralela a la fibra



En la Tabla 4 podemos observar una descripción de los resultados del cálculo del módulo de elasticidad de los ensayos de compresión paralela a la fibra. El método aplicado es el recomendado por la norma ISO 22157 (2021). El valor medio del módulo de elasticidad (E) fue de 23310.06 MPa, con una desviación estándar de 14254.83

MPa. Consecuentemente, el valor característico del módulo de elasticidad (E) resultó ser muy bajo 1060.13 MPa, debido a la dispersión entre los tres resultados. Sin embargo, este valor es útil al ser conservador. Es decir, existirán deformaciones menores a las calculadas usando este módulo de elasticidad.

Tabla 4

Resultados de módulo de elasticidad de compresión paralela a la fibra

Muestra	IC012 NUDO		MC009/SN		SC009/SN	
σ_{ult}	53,88	MPa	54,03	MPa	51,45	MPa
0,6 σ_{ult}	32,33	MPa	31,21	MPa	30,84	MPa
0,2 σ_{ult}	11,51	MPa	11,15	MPa	10,28	MPa
ϵ_{60}	0,002801		0,001164		0,000637	
ϵ_{20}	0,00058		0,00028		0,00094	
E	9372,156	MPa	22692,31	MPa	37863,72	MPa

La Figura 14 pone a la vista que la resistencia a la compresión paralela a la fibra disminuye ligeramente si se incrementa el área de la sección transversal

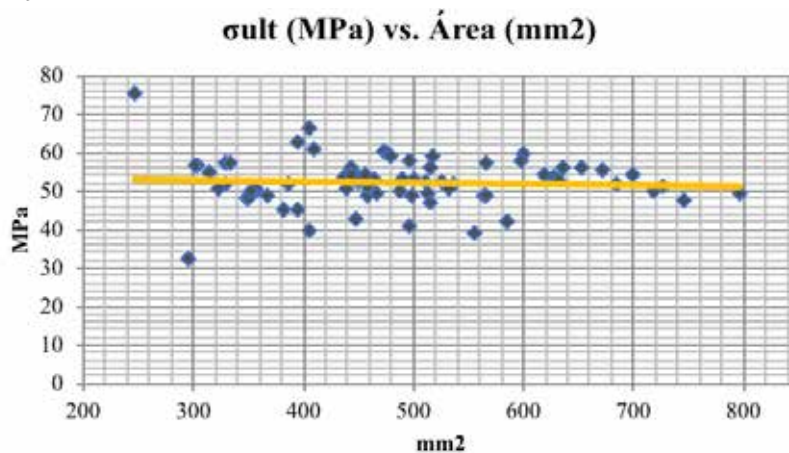
del bambú. La falla a compresión en la muestra ocurre por la separación de las fibras, debido a que la lignina que las aglutina falla. Consecuentemente,

mientras mayor sea el área de la sección transversal, mayor volumen de lignina se necesita. Y cualquier defecto, ya sea ese o una separación natural en las fibras, va a causar que la resistencia disminuya. El gráfico evidencia también que los resultados de resistencia a la compresión se concentran alrededor del valor de 52

MPa, formando una línea casi horizontal, con una pendiente negativa muy baja. También se confirmó que mientras mayor era el área de la sección transversal, tenía que aplicarse una carga más significativa para poder provocar una falla en el ejemplar durante el ensayo.

Figura 14

Variación del esfuerzo último con relación al área de la sección transversal

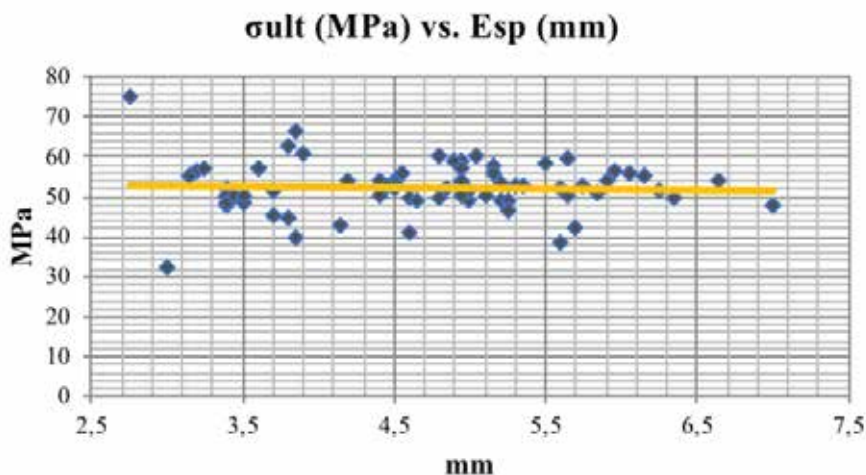


Lo que revela la Figura 15, en cuanto a la resistencia a la compresión paralela a la fibra, es que esta disminuye de manera ligera si el espesor de la pared aumenta. Mientras mayor sea el espesor de la pared del bambú, mayor cantidad de lignina es necesaria. Lo que prueba que concentrar una mayor cantidad de fibras al aumentar

el espesor no causa un efecto beneficioso en la resistencia a la compresión paralela a la fibra, debido a que la falla ocurrirá en la lignina. Sin embargo, a mayor espesor de la pared del bambú, se requerirá aplicar una mayor carga para provocar una falla por compresión paralela a la fibra.

Figura 15

Variación del esfuerzo último con relación al espesor de la pared del bambú

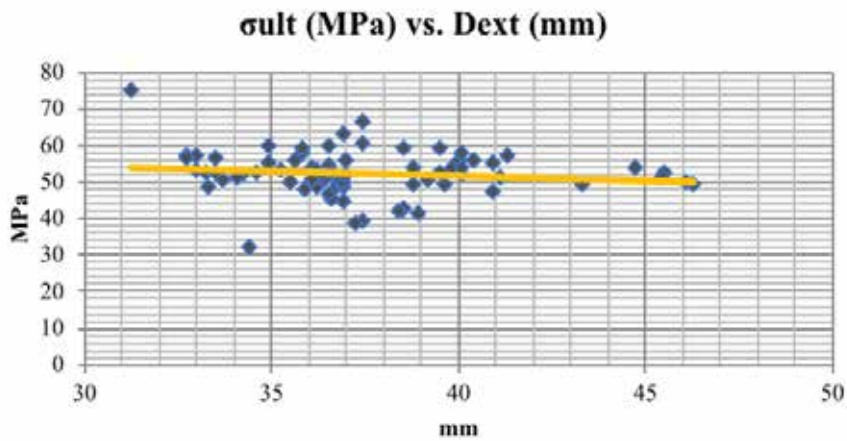


La Figura 16 muestra que la resistencia a la compresión paralela a la fibra de este bambú disminuye cuando se aumenta el diámetro exterior del culmo. Similar a las anteriores propiedades, esto es debido a que, en una sección transversal con un diámetro exterior mayor, la separación

de las fibras tiene mayor influencia en su resistencia gobernada por la lignina. Debido a que un incremento en el diámetro exterior causa una mayor área de la sección, mayor carga debe ser aplicada para causar una falla cuando eso ocurre.

Figura 16

Variación del esfuerzo último en relación al diámetro exterior del bambú

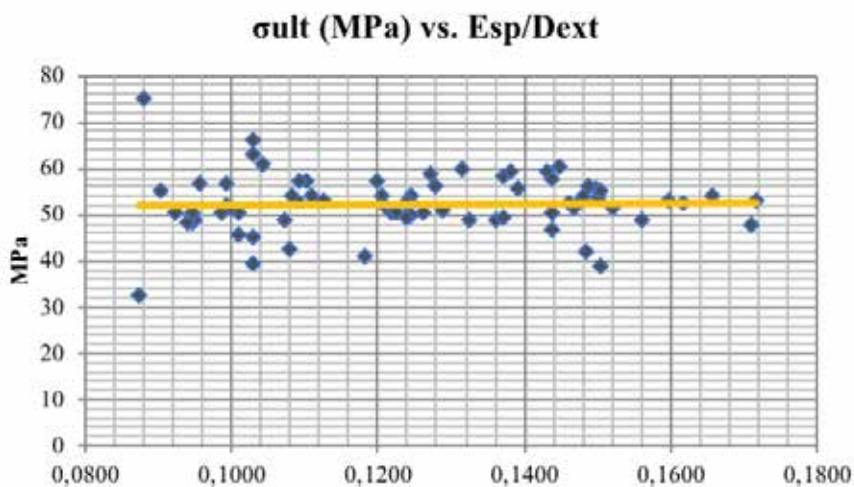


Al dividir el espesor de la pared del bambú para el diámetro exterior de la muestra, se obtiene una relación Espesor/Diámetro exterior (Esp/Dext), el cual puede ser importante para encontrar una relación entre estas dos variables de la sección transversal. La Figura 17 muestra

que la resistencia a la compresión paralela a la fibra incrementa, ligeramente, cuando se aumenta la relación Esp/Dext de la muestra. Esto indica que el espesor de la pared del bambú es más importante que el diámetro exterior para la resistencia a la compresión paralela a la fibra.

Figura 17

Variación del esfuerzo último versus la relación (Espesor/Diámetro exterior)

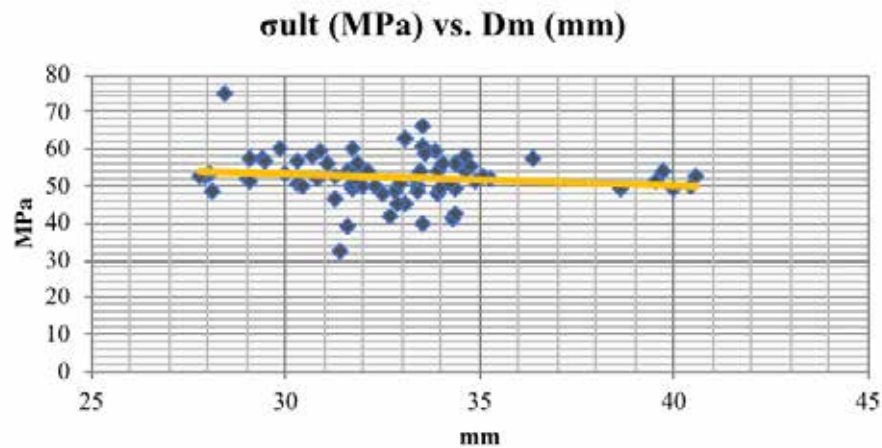


El diámetro medio (D_m) es el resultado de la diferencia entre el diámetro exterior y el espesor de la pared del bambú. Es una variable fácil de medir y puede ser útil para clasificar a un grupo de culmos según su probable resistencia. La Figura 18 muestra que la resistencia a la compresión paralela a la fibra disminuye

cuando el diámetro medio del ejemplar aumenta. A mayor espesor de la pared del bambú, menor va a ser el diámetro medio (D_m). Consecuentemente, mayor carga de compresión será necesaria cuando el espesor sea mayor para causar una falla de compresión paralela a la fibra.

Figura 18

Variación del esfuerzo último versus el diámetro medio del bambú



En la Tabla 5 se observan los valores de resistencia última del hormigón, que fueron determinados por la norma ACI 318 (2019), la resistencia del acero estructural, establecido acorde a la norma AISC 360 (2016) y las resistencias últimas

del bambú *Guadua Angustifolia* Kunth que fueron precisadas por La Tegola et al. (2015), conjuntamente con los valores obtenidos del bambú *Phyllostachys aurea* durante esta investigación.

Tabla 5

Resistencia última de materiales tradicionales de construcción vs. Phyllostachys aurea

σult a la compresión del hormigón a los 28 días	20 - 55	MPa
σult promedio a la compresión del bambú <i>Phyllostachys aurea</i>	52,45	MPa
σult promedio a la compresión del bambú <i>Guadua Angustifolia</i> Kunth	37	MPa
σult a la tracción del acero	450	MPa
σult a la tracción paralela a la fibra del bambú <i>Phyllostachys aurea</i>	90,21	MPa
σult a la tracción paralela a la fibra del bambú <i>Guadua Angustifolia</i> Kunth	117	MPa

Estas comparaciones muestran que el hormigón (como material usado mayoritariamente para resistir cargas a compresión), cuenta con una ineficiente relación resistencia versus densidad (Figura 19), demostrando

que una estructura de hormigón es sumamente pesada. Al contrario, la especie de bambú *Phyllostachys aurea* (PA), tiene el valor más alto en cuanto a la relación resistencia versus densidad comparado con los otros tres materiales,

evidenciando que puede ser un material muy apropiado para trabajar en elementos cortos sometidos a compresión paralela

a la fibra porque disminuye el peso de cualquier estructura, y por lo tanto, reduce su carga sísmica.

Figura 19

Comparación de la resistencia a la compresión con otros materiales

$$\begin{aligned}
 \text{Hormigon} &:= \frac{55 \text{ MPa}}{\left(2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 2336.85 \\
 \text{Acero} &:= \frac{450 \text{ MPa}}{\left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 5845.507 \\
 \text{Gak} &:= \frac{37 \text{ MPa}}{\left(800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 4716.187 \\
 \text{P.A.} &:= \frac{52.45 \text{ MPa}}{\left(800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 6685.514
 \end{aligned}$$

La Figura 20 muestra la relación de la resistencia última a la tracción con la densidad, para el acero estructural, el bambú *Guadua Angustifolia* Kunth, y el bambú *Phyllostachys aurea*. Los resultados revelan que el acero estructural (material por excelencia usado para resistir cargas a

tracción) posee la peor relación resistencia versus densidad. El bambú *Phyllostachys aurea* (P.A) establece una relación casi dos veces más alta que la del acero estructural, lo que quiere decir que un elemento estructural de este bambú, va a ser dos veces más ligero que uno de ese material.

Figura 20

Comparación de la resistencia a la tracción con otros materiales

$$\begin{aligned}
 \text{Acero} &:= \frac{450 \text{ MPa}}{\left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 5845.507 \\
 \text{Gak} &:= \frac{117 \text{ MPa}}{\left(800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 14913.35 \\
 \text{P.A.} &:= \frac{90.21 \text{ MPa}}{\left(800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g\right) \cdot m} = 11498.575
 \end{aligned}$$

El bambú *Phyllostachys aurea* puede resistir la misma carga a la tracción

que un acero estructural (450 MPa) empleando solo un 51% del peso del

acero, además, esta especie puede resistir una carga de compresión igual a la de un hormigón común (28 MPa) con tan solo el 7% del peso del hormigón. El bambú *Phyllostachys aurea* puede resistir la misma carga a compresión que un bambú *Guadua angustifolia* Kunth, usando solo el 92.3% del peso del bambú Gak. Algo bastante positivo, puesto que se obtiene mucha resistencia en relación al bajo peso propio del material, aunque su deformación también es mayor, debido a que es un material muy flexible.

Dewey (1933) asevera en su teoría del conocimiento que “*la reflexión incluye a la observación*” (p. 102). El objetivo de esta

interacción es motivar el aprendizaje desde la experiencia, pero también a través del pensamiento reflexivo. Bajo esta premisa, se desarrolló un taller de construcción con estudiantes de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Central del Ecuador como práctica de prueba, en donde se utilizaron más de 80 culmos de *Phyllostachys aurea* extraídos de la comuna de Wawa-Sumaco, de una edad aproximada de 4 años, en estado seco y preservado, con longitudes que iban de los 3 a los 4,50 metros (ISO 19624, 2018). Lo que permitió comprobar el potencial de esta especie como material de construcción, así como su aplicación en estructuras tectónicas (Figura 21).

Figura 21

Materialización de estructura tectónica con culmos de *Phyllostachys áurea*



Conclusiones

Las relaciones geométricas evidenciaron que mientras mayor sea el espesor de la pared del bambú (t_w), mayor será su resistencia a la compresión. Lo que mostró que por cada milímetro de espesor en la pared del bambú (t_w) se obtienen

11.22 MPa de resistencia última a la compresión paralela a la fibra. En contraste, el diámetro exterior del bambú (D_{ext}) no mostró una mayor influencia en la resistencia a la compresión paralela a la fibra de esta especie, aunque se puede evidenciar que por cada milímetro de diámetro exterior (D_{ext}) se obtiene por

lo menos 1.4 MPa de resistencia a la compresión paralela a la fibra.

La relación geométrica de la división (ratio) entre el espesor y el diámetro exterior (t_w/D_{ext}) reveló que mientras este valor se incrementa, la resistencia a la compresión de este bambú también aumentará. Por ejemplo, si la relación (t_{w1}/D_{ext1}) del ejemplar No 1 es el doble a la relación (t_{w2}/D_{ext2}) del ejemplar No 2, significa que el ejemplar No 1 va a tener una resistencia a la compresión 1.63 veces mayor a la del ejemplar No 2. En las muestras ensayadas, la resistencia a la compresión paralela a la fibra presentó una baja desviación estándar en los resultados, con una resistencia promedio de 52.4 MPa. El análisis estadístico de los resultados de estos ensayos revela una distribución normal (campana de gauss), lo que aumentó la confiabilidad de los resultados obtenidos. En contraste, la resistencia a la tracción paralela a la fibra de este bambú expone una alta desviación estándar en los resultados, debido a

la dificultad de preparar la muestra requerida según la norma específica. Sin embargo, la resistencia promedio dentro de este parámetro fue de 90.2 MPa, lo cual confirma que es un material de alta resistencia frente a este tipo de carga. Las resistencias a la compresión y tracción de esta especie fueron comparadas con las de otros materiales convencionales muy utilizados en la construcción.

Los resultados obtenidos durante este trabajo abren nuevos campos de investigación para establecer el comportamiento de elementos esbeltos tipo columnas que permitan calibrar las fórmulas de resistencia a la compresión recomendadas por la norma ISO 22156:2021 de diseño estructural con bambú. Así mismo, los resultados de resistencia a la tracción paralela a la fibra, posibilita el iniciar una investigación de una conexión entre el bambú sometido a tracción paralela a la fibra y una determinación de valores de resistencia para usarse en diseño.

Referencias

- ACI - American Concrete Institute. (2019). *ACI 318, Requisitos de reglamento para concreto estructural*, Farmington Hills, MI.
- ACI - American Institute of Steel Construction. (2016). *AISC 360, Especificación para construcciones de acero*, Chicago, IL.
- Añasco, M. y Rojas, S. (2015). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie Guadua angustifolia*. INBAR.
- Boustead, I. y Hancock, GF. (1979). *Handbook of industrial energy analysis*. Ellis Horwood Limited. <https://doi.org/10.1002/aic.690260138>
- Cadena, D., Descamps, T., y Laplume, D. (octubre, 2018). *Nuevos materiales y formas arquitectónicas para las construcciones de bambú en Ecuador*. [Presentación de paper] 11º Congreso Mundial de Bambú, Xalapa, México. <https://worldbamboo.net/wbcxi/papers/Cadena,%20Daniela,%20Thierry%20Descamps.pdf>

- García, B., Preciado, C., Bedoya, M. y Mendoza, O. (2019). Mechanical characterization of *h* and Guadua bamboo. *MATEC Web of Conferences*, 303(2019), 03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930303002>
- Gomes Neto, J., Barbosa, N., Beraldo, A. y De Melo, A. (2021). Physical and mechanical properties of the bambusa vulgaris as construction material. *Engenharia Agrícola*, 41(2), 119-126. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v41n2p119-126/2021>
- González M.J. y Navarro J.G. (2006). Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Build Environ*, 41 (7), 902-909. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.006>
- International Organization for Standardization. (2004). *Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo - Part 1: Requirements. ISO* (ISO 22157)
- International Organization for Standardization. (2004). *Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo - Part 2: Test methods. (ISO/TR 22157)*
- International Organization for Standardization. (2018). *Determination of Physical and Mechanical Properties of Bamboo - Part 1: Requirements. ISO*. (ISO 19624)
- International Organization for Standardization. (2019). *Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms. (ISO/FDIS 22157)*
- International Organization for Standardization. (2021). *Bamboo structures – Bamboo culms - Structural design. (ISO 22156)*
- La Tegola, A., Yépez, L., Mera, W. y Córdova, P. (2015). Determinación de las propiedades mecánicas de la caña Guadua Angustifolia del Ecuador cuando está sometida a fuerzas axiales. *Revista Alternativas*, 17, 54-61.
- Liu, P., Xiang, P., Zhou, Q., Zhang, H., Tian, J. & Argaw, M. (2021). Prediction of Mechanical Properties of Structural Bamboo and Its Relationship with Growth Parameters. *Journal of Renewable Materials*, 9(12), 2223-2239. <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.015544>
- Liu, P., Qin, Y., Zhou, Q., Xiang, P., Zhou, X. & Shan, Y. (2022). Experimental investigation on the physical and mechanical properties of *P. edulis* bamboo and their correlations. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, 569–584. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01773-4>
- Londoño X., (2021). *Diversidad de bambúes en las provincias amazónicas de Napo, Pastaza y Morona*

Santiago - Ecuador: Guía Técnica.
Organización Internacional del
Bambú y el Ratán (INBAR).

downloads/2017/04/NEC-SE-
GUADUA-VERSION-FINAL-
WEB-MAR-2017.pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería,
Mesa Sectorial del Bambú y
Red Internacional del Bambú
y el Ratán. (2018). *Ecuador:
Estrategia Nacional del Bambú
2018-2022* [https://bambu.com.
ec/wp-content/uploads/2021/01/
Estrategia-Nacional-Bambu-2018-
2022-Version-Resumida.pdf](https://bambu.com.ec/wp-content/uploads/2021/01/Estrategia-Nacional-Bambu-2018-2022-Version-Resumida.pdf)

Pereira, M. y Beraldo, A. (2007). *Bambu
de corpo e alma*. Canal6: Projetos
editoriais.

Ministerio de Desarrollo Urbano y
Vivienda [MIDUVI]. (2017).
Norma Ecuatoriana de la
Construcción – Seguridad
Estructural – Estructuras
de Guadua (Gak). [https://
www.habitatyvivienda.gob.
ec/wp-content/uploads/](https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/)

Srivaró, S., Jakranod, W. (2016).
Comparison of physical and
mechanical properties of
Dendrocalamus asper Backer
specimens with and without nodes.
*European Journal of Wood and Wood
Products*, 74, 893–899. [https://doi.
org/10.1007/s00107-016-1048-8](https://doi.org/10.1007/s00107-016-1048-8)

Wakchaure, M. y Kute, S. (2012). Effect
of moisture content on physical and
mechanical properties of bamboo.
Asian Journal of Civil Engineering,
13. 753-763.