



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE FÍSICA "LUIS RIVERA TERRAZAS"

**"ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL BAMBÚ
UTILIZANDO MICROTOMOGRAFÍA
COMPUTARIZADA (MICRO-TC) DE RAYOS X"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS
(EN LA ESPECIALIDAD DE CIENCIA DE
MATERIALES)**

PRESENTA:

EDGAR RODRÍGUEZ LÓPEZ

ASESOR:

DR. CÉSAR MÁRQUEZ BELTRÁN

No. de CVU: 869372

ENERO 2020

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada en el periodo enero 2018 - julio 2019 para la realización de esta maestría. VU/Becario: 869372.

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del programa IV. Investigación y Posgrado. Apoyar a los programas de posgrado para lograr su incorporación al Padrón Nacional de calidad. Indicador establecido en el plan de Desarrollo Institucional 2017-2021.

Al instituto de Física “Ing. Luis Rivera Terrazas” por la oportunidad de permitirme continuar con mi preparación profesional y acrecentar mis conocimientos.

Al D. Jorge Raúl Cerna Cortez, director del Centro Avanzado De Pruebas Analíticas No Destructivas de la BUAP por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Jaime Ríos Calleja por su colaboración con la adquisición de las muestras de bambú y asesoría sobre cada una de las diferentes especies analizadas.

Al Mtro. José Alfredo Mejía Pérez, director de los laboratorios de la facultad de ingeniería de la BUAP, por permitirme el uso del laboratorio de pruebas mecánicas.

Al comité Revisor: Dr. Nicolás Rutilo Silva González (Presidente), Dr. José Luis Eustolio Carrillo Estrada (secretario), Dr. Enrique Sánchez Mora (vocal), Dr. César Márquez Beltrán (vocal), por su aporte y participación activa para la mejoría de este trabajo .

A la Dra. Ma. Eugenia Mendoza Álvarez directora del IFUAP.

A la Dr. Lília Meza Montez coordinadora del posgrado en la especialidad de ciencia de materiales.

Al Dr. Umapada pal (tutor).

Al Ing. Alejandro Hernández por la supervisión y asesoría para la realización de las pruebas mecánicas realizadas en este trabajo, laboratorio de mecánica en la FI-BUAP.

A los Ingerieros: Paola, Popoca, Hector Hugo, Oscar, Iván, Victor, colaboradores del laboratorio de mecánica.

A la Quím. Gabriela Espino, técnico del laboratorio del Centro De Pruebas Analíticas No Destructivas, por su orientación en el uso del equipo, así como a la Mtra. Anyi Tacuma.

Al Ing. Delfino Romero Gaspariano encargado del taller mecánico del IFUAP.

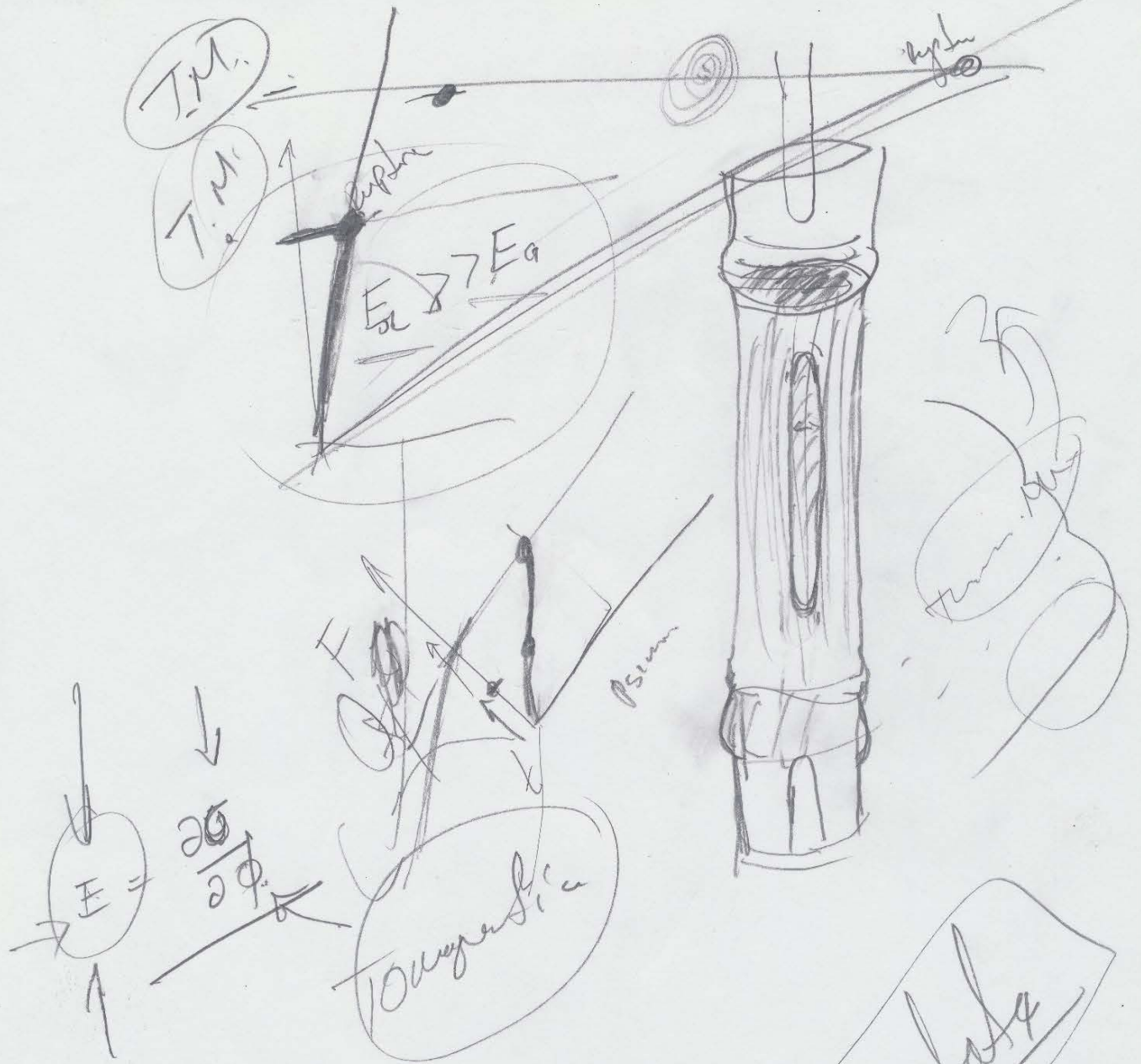
Al Ing. Leonel San Román Escudero encargado del laboratorio de química general.

A los lic. Nelson y Luis del centro de cómputo del IFUAP.

A mis profesores que de alguna manera incentivaron mi crecimiento profesional.

Al personal que labora en el IFUAP por sentirme como en casa.

A mis compañeros y amigos de generación por hacer más amena mi estadía. A Denisse, Emigdio, y Alberto por ser parte de un gran equipo. A José Nuñez por su contribución en mi desarrollo profesional. A Axl Paul por mostrarme que siempre hay algo que aprender en esta vida.

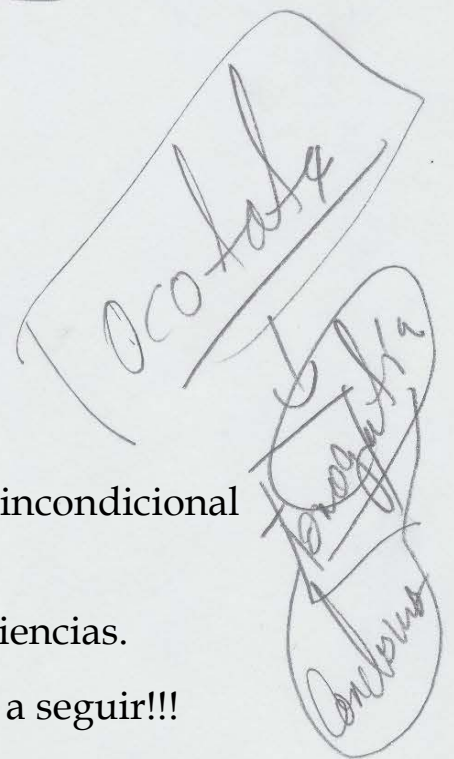


DR. CÉSAR MÁRQUEZ BELTRÁN

Una hoja no es suficiente para describir el apoyo incondicional que me ha brindado...

Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias.

Es un honor trabajar con usted, es mi inspiración a seguir!!!



Dedicada a:
mi madre María Anastacia,
mi padre Noé
y mis hermanos Yeudiel, Aleidit, y Mitzy.

“ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEL BAMBÚ UTILIZANDO MICRO-TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA (MICRO-TC) DE RAYOS X”

RESUMEN

La Tomografía Computarizada (TC) de rayos X es una técnica no destructiva que permite mostrar la distribución espacial de los coeficientes de atenuación lineal de un material, y depende de la densidad, la composición química de la muestra, así como de la energía de rayos X utilizada. Una mayor densidad y/o mayor número atómico en un material dará como resultado una mayor atenuación de los rayos X incidentes.

En este trabajo de tesis se utilizó la técnica de TC para caracterizar la estructura interna de diferentes especies de bambúes (*Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii*, *Otatea acuminata*) y Ocotate (nombre común del bambú, especie aún no identificada) con el objetivo de correlacionar dicha estructura con sus propiedades mecánicas (ya sea esfuerzo de tensión y/o compresión). Se determinó el módulo de elasticidad o módulo de Young de las diferentes especies de bambúes por medio de medidas experimentales de tensión (o compresión) vs. deformación, obteniendo 491.63 MPa (*Guadua angustifolia*), 2,537.20 MPa (*Bambusa oldhamii*), 645.85 MPa (*Otatea acuminata*), y 550.19 MPa (Ocotate); para los ensayos de compresión vs. deformación se obtuvo 20,317 MPa (*Guadua angustifolia*), 90,955 MPa (*Bambusa oldhamii*), 13,322 MPa (*Otatea acuminata*), y 8,765 MPa (Ocotate). Se observó que la especie que soporta mayor esfuerzo a la tensión y compresión fue *Bambusa oldhamii* mientras que aquellos con menor esfuerzo a la tensión y compresión fueron *Guadua angustifolia* y Ocotate, respectivamente.

Por otro lado, los experimentos de TC fueron realizados a 3 especies de bambú y por medio de análisis de imagen fue posible calcular la distribución de la densidad de cada una de ellas. Para dicho cálculo se tomaron como referencia dos compuestos con densidades conocidas: agua (1000 kg/m^3) y polipropileno (910 kg/m^3) los cuales se relacionaron con la escala de grises (Gs) de la imagen tomográfica, con esto fue posible realizar una curva de calibración de la densidad respecto a Gs. Una vez realizado este procedimiento se encontró la densidad del bambú, por comparación de Gs. Los resultados mostraron que el perfil de densidad en la dirección radial aumenta desde el radio interior al radio exterior. Por otro lado, la densidad aparente promedio para las especies *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* y *Otatea acuminata* fue de 775.19 kg/m^3 , 877.01 kg/m^3 y 879.67 kg/m^3 , respectivamente.

Con ambos resultados (tomografía y pruebas mecánicas) se comparó la densidad del material y las propiedades mecánicas (esfuerzos de tensión y compresión), donde en principio se debe tener en cuenta que a mayor densidad del material mayor deberá ser la resistencia a la tensión y compresión. Sin embargo, los resultados experimentales muestran que el módulo de Young o la resistencia del material a esfuerzos de tensión y compresión no depende solamente de la densidad aparente del material, lo que sugiere que las propiedades físicas de las fibras, la estructura interna y del gradiente de la densidad a lo largo de la dirección radial y longitudinal en el nudo y entrenudo del bambú son parámetros importantes que deben considerarse.

“STUDY OF THE STRUCTURE OF THE BAMBOO USING X-RAY COMPUTERIZED (MICRO -CT) MICROTOMOGRAPHY ”

ABSTRACT

X-ray Computed Tomography (CT) is a non-destructive technique that allows us to show the spatial distribution of linear attenuation coefficients of a material, and depends on the density, chemical composition of the sample, as well as the energy of rays X used. Higher density and / or higher atomic number in a material will result in greater attenuation of incident X-rays.

In this thesis, the CT technique was used to characterize the internal structure of different bamboo species (*Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii*, *Otatea acuminata*) and Ocotate (common name of bamboo, species not yet identified) with the objective of correlating their structure with its mechanical properties (either tensile and compressive stress). The modulus of elasticity or Young's modulus of the different bamboo species was determined by means of experimental measures of tensile (or compressive) vs. deformation, obtaining 491.63 MPa (*Guadua angustifolia*), 2,537.20 MPa (*Bambusa oldhamii*), 645.85 MPa (*Otatea acuminata*), and 550.19 MPa (Ocotate); for compression tests vs. Deformation was obtained 20,317 MPa (*Guadua angustifolia*), 90,955 MPa (*Bambusa oldhamii*), 13,322 MPa (*Otatea acuminata*), and 8,765 MPa (Ocotate). It was observed that the species with the greatest stress effort supported was *Bambusa oldhamii*, while those with less tensile and compressive stress supported were *Guadua angustifolia* and Ocotate, respectively.

On the other hand, the CT experiments were performed on 3 bamboo species and through image analysis it was possible to calculate the density distribution of each of them. For this calculation, two compounds with known densities were taken as reference: water (1000 kg/m^3) and polypropylene (910 kg/m^3) which were related to the gray scale (Gs) of the tomographic image, with this it was possible to perform a density calibration curve which depends of Gs. Once this procedure was performed, the bamboo density was found by comparison of Gs. The results showed that the density profile in the radial direction increases from the inner radius to the

outer radius. On the other hand, the average apparent density for the species *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* and *Otatea acuminata* was 775.19 kg/m³, 877.01 kg/m³ and 879.67 kg/m³, respectively

With both experimental results (tomography and mechanical tests) the density of the material and the mechanical properties were compared, where in principle it should be taken into account that the higher the density of the material, we will have the greater tensile and compressive resistance. However, experimental results showed that Young's modulus does not depend only of the bulk density of the material, suggesting that the physical properties of the fibers, the internal structure and the density profile along the radial and longitudinal direction of the bamboo are important parameters that should be considered.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Resumen | 1 |
| Abstract | 3 |
| Contenido | 5 |
| Antecedentes | 6 |
| Objetivos | 11 |
| 1 Generalidades | 12 |
| 1.1. El Bambú | 12 |
| 1.1.1. Identificación de las especies | 13 |
| 1.1.2. Taxonomía del bambú | 14 |
| 1.2. Micro TC | 19 |
| 1.2.1. Generación de rayos X | 20 |
| 1.2.2. Interacción con la materia | 22 |
| 1.2.3. Imágenes | 23 |
| 2 Metodología | 25 |
| 2.1. Materiales | 25 |
| 2.2. Propiedades mecánicas | 25 |
| 2.2.1. Prueba de tensión | 27 |
| 2.2.2. Prueba de compresión | 28 |
| 2.2.3. Relación tensión-deformación | 28 |
| 2.3. Tomografía | 30 |
| 3 Resultados y discusiones | 34 |
| 3.1. Propiedades mecánicas del bambú | 34 |
| 3.1.1. Pruebas de tensión de la especie <i>Guadua angustifolia</i> | 34 |
| 3.1.2. Pruebas de compresión de la especie <i>Guadua angustifolia</i> | 40 |
| 3.1.3. Prueba de tensión de la especie <i>Bambusa oldhamii</i> | 45 |
| 3.1.4. Prueba de compresión de la especie <i>Bambusa oldhamii</i> | 48 |
| 3.1.5. Prueba de tensión de la especie <i>Otatea acuminata</i> | 52 |
| 3.1.6. Prueba de compresión de la especie <i>Otatea acuminata</i> | 55 |
| 3.1.7. Prueba de tensión del bambú <i>Ocotate</i> | 59 |
| 3.1.8. Prueba de compresión del bambú <i>Ocotate</i> | 61 |
| 3.1.9. Tabla de resultados de las 4 especies | 66 |
| 3.2. Tomografía | 68 |
| 3.2.1. Cálculo de la densidad aparente del bambú | 69 |
| 3.2.2. Cálculo de la densidad de la especie <i>Guadua angustifolia</i> | 71 |
| 3.2.3. Cálculo de la densidad de la especie <i>Bambusa oldhamii</i> en el entrenado | 79 |
| 3.2.4. Cálculo de la densidad de la especie <i>Bambusa oldhamii</i> en el nudo | 83 |
| 3.2.5. Cálculo de la densidad de la especie <i>Otatea acuminata</i> | 85 |
| 4 Orientación de las fibras..... | 92 |
| Conclusiones | 96 |
| Bibliografía | 98 |

ANTECEDENTES:

Para solucionar problemas ambientales las industrias buscan nuevos materiales biodegradables o de origen natural. Algunos de ellos son aplicados como materiales de construcción en la arquitectura llamada sustentable. Históricamente el bambú se ha usado como material de construcción, lo que ha permitido un desarrollo integral en nuevas técnicas y métodos arquitectónicos, tal como lo muestra un gran número de viviendas, teatros, edificios, y puentes en varios países del mundo.

A lo largo del continente americano los géneros más abundantes de bambú son: *Elytostachys*, *Arthrostyloidium* y *Guadua*. De hecho, el continente americano ocupa el segundo lugar en abundancia de especies de bambú, antecedido por Asia. Existen más de 1000 especies de bambú en total, que se dividen en plantas herbáceas y leñosas. De los países americanos, Brasil tiene la mayor cantidad de especies con alrededor de 140, seguido de Colombia con 72 y Venezuela con 68 especies, en tanto que México se encuentra en el sexto lugar con 39 especies.

26 especies de *Guadua* se distribuyen desde el centro de México hasta el Norte de Argentina, en regiones cuyas altitudes van desde 0 a 2200 metros. Las cinco especies de *Guadua* que existen en México alcanzan las mayores dimensiones de todos los bambúes que se desarrollan en este país y llegan a medir hasta 25 m de altura con un diámetro en la base de 25 cm. Es una especie que desarrolla espinas en todas las ramas, tiene entrenudos huecos de 20 cm a 30 cm de largo y de 2 cm de espesor¹.

De hecho, el bambú es una planta ampliamente utilizada en diferentes aplicaciones como: la industria alimentaria, medicamento, pulpa de papel, fibra textil, andamiaje y material de construcción (sus propiedades mecánicas compiten con aquellos materiales de construcción actuales: hierro y cemento). Particularmente el estudio y la investigación del rendimiento térmico y mecánico del bambú en la última década han sido primordiales para evaluar la viabilidad de aplicarlos en la arquitectura sustentable.

Para el caso del bambú, la densidad no es solo una propiedad física de un objeto sino también un dato necesario en la investigación cuantitativa de propiedades térmicas (calor específico; la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad) y mecánicas (módulo específico; consiste en el módulo de elasticidad por la densidad de masa de un material) para su análisis. La densidad aparente es

relativamente fácil de medir. Sin embargo, el simple uso de la densidad aparente para realizar análisis térmicos y mecánicos no es apropiado, ya que la densidad a menudo varía en función de la posición y la orientación en un material natural.

La figura I muestra un esquema representativo de una estructura macroscópica de la caña de bambú. Se caracteriza por tener un espacio entre dos nudos, el cual se conoce como entrenudo; su separación es característica de cada especie y varía a lo largo del tallo del bambú. Dentro de los entrenudos, fibras de celulosas y filamentos (tejidos vasculares) corren paralelas a la longitud del bambú, mientras que los nudos se entrecruzan de forma transversal (figura II), con algunas fibras que se cruzan hacia el diafragma nodal² (membrana rígida que divide el interior de la caña en secciones).

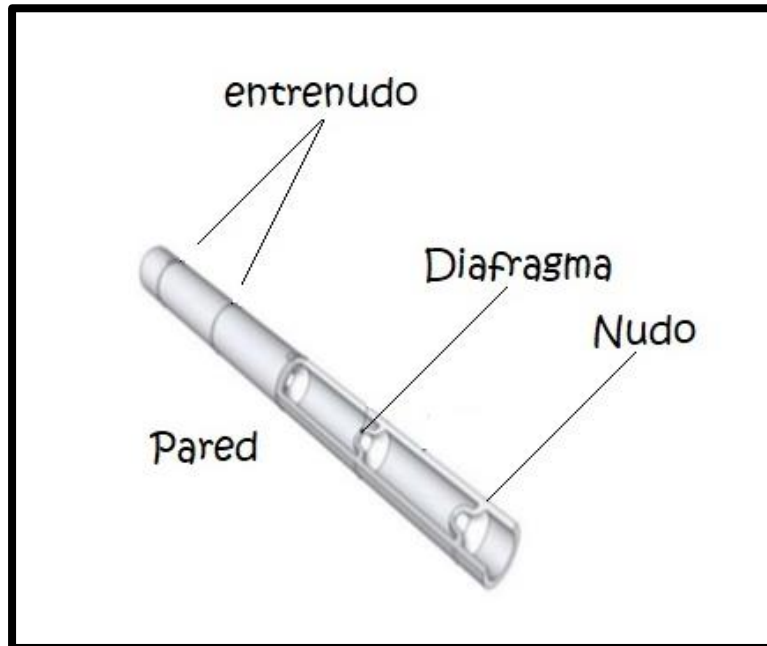


Figura I. Esquema del bambú.

Como se mencionó anteriormente, la capacidad calorífica y la densidad del material son propiedades físicas que se relacionan con el transporte térmico y tensiones mecánicas. En el caso del bambú su densidad es inhomogénea y depende de la estructura interna del culmo o tallo, es decir, del grosor de la pared, así como del número, distribución y orientación de las fibras, por lo que estudios del bambú con tomografía computarizada de rayos X son necesarios para analizar la estructura interna, con el propósito de obtener perfiles de densidades en diferentes direcciones del culmo (longitudinal, radial y tangencial) y relacionarlos con esfuerzos mecánicos, en particular con la resistencia a la tensión y compresión.

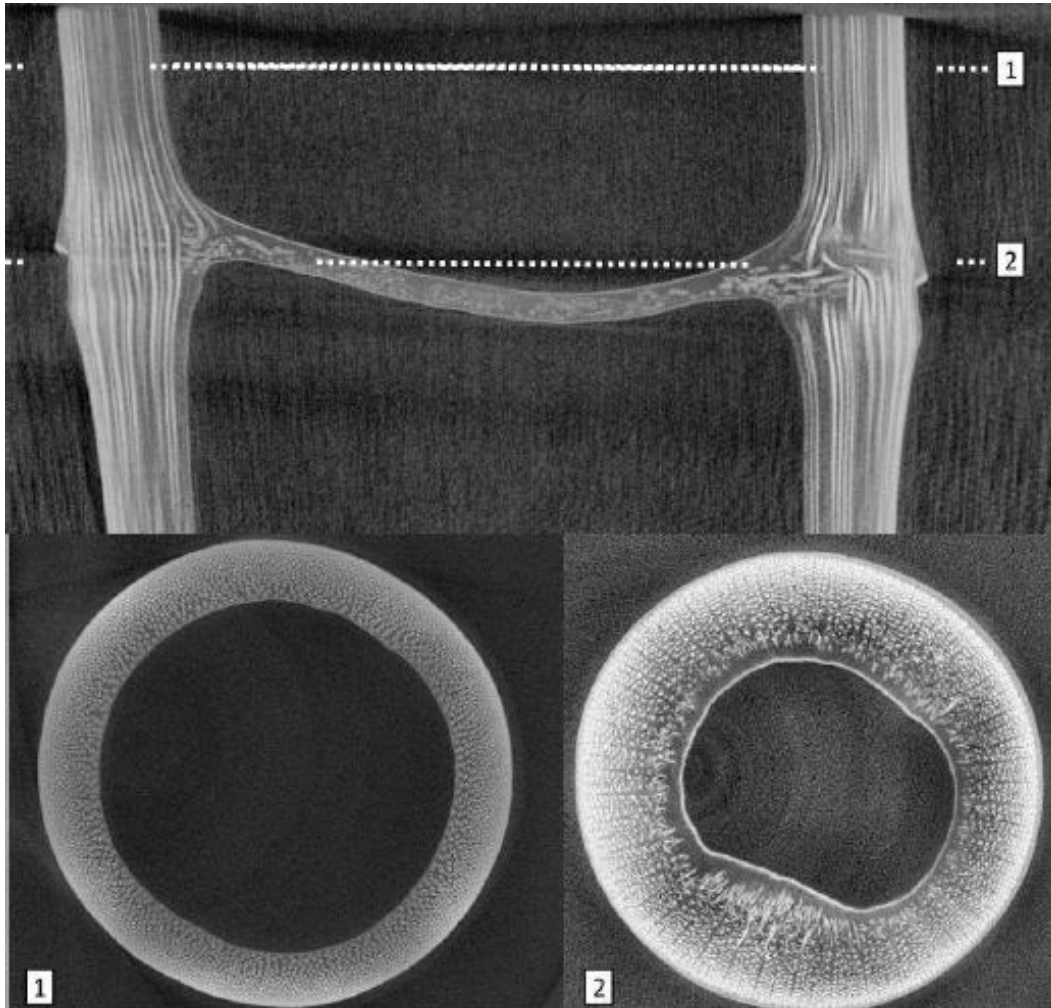


Figura II. Imagen tomográfica del bambú Moso³.
Características morfológicas: 1) entrenudo, 2) nudo.

Las fibras de bambú tienen estructura polilaminar y conforme madura se presenta una mayor cantidad de láminas, característica observada en la especie *Guadua aculeata*. Las fibras son las estructuras de soporte, a mayor grosor presentan mayor resistencia mecánica; las paredes gruesas de *Guadua aculeata* junto con la estructura polilaminar hacen de sus culmos un material adecuado para el uso en la construcción¹.

Hasta el momento se han desarrollado ciertas tecnologías no destructivas sobre la medición de la densidad del bambú, y se han comparado con la madera. El bambú Moso es más rígido tanto en flexión como en compresión que la madera debido a su densidad⁴.

La exploración por Micro TC de rayos X se ha aplicado en la investigación relacionada con la industria de la madera⁴ desde los años 80. En particular, esta técnica se ha propuesto utilizarla como una herramienta experimental en la densitometría de materiales; experimentos que serán llevados a cabo en esta tesis. Cabe mencionar que esta técnica experimental aplicada al estudio de la estructura interna de materiales densos orgánicos e inorgánicos, aún está en desarrollo en México, por lo que en este trabajo de tesis se pretende dar las bases metodológicas para la caracterización de materiales (en este caso, el bambú) por medio de la reconstrucción tridimensional de la estructura interna obtenida por Micro TC de rayos X.

Huang³ estudió el perfil de la distribución de la densidad del *phyllostachys edulis* (bambú Moso) por medio de tomografía computarizada de rayos X y encontró que zonas de alta densidad del bambú Moso se concentran en el lado externo de la pared del culmo para las partes del entrenudo y del nudo. Por otro lado, las zonas de baja densidad del bambú Moso aparecen en el lado interno de la pared del culmo de bambú de las partes del entrenudo. La densidad de ambas zonas del entrenudo y las zonas del nudo del bambú Moso disminuye desde la superficie externa a la superficie interna de la pared del culmo en la dirección radial.

La definición de las propiedades mecánicas de los materiales juega un papel fundamental para resistir cargas externas o para soportar tensiones mecánicas⁶. Uno de los problemas principales que se ha encontrado en el bambú es el cambio de las propiedades físicas (densidad, dureza, permeabilidad) y mecánicas (resistencia a la tensión, módulo de elasticidad, porcentaje de elongación) de acuerdo a su estructura y madurez de los culmos⁷.

Se realizaron medidas experimentales al culmo en diferentes rangos de edad⁸ de la especie *Guadua angustifolia* relacionadas con la resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación, ver tabla A. Los resultados mostraron que aquellos culmos con una madurez de 3 - 6 años tenían una resistencia a la tensión mayor, sugiriendo que estos bambúes pueden ser mejor candidatos para usarlos como materiales de construcción respecto a los culmos jóvenes (1 a 3 años) o sobremaduros (6 años en adelante). Y como se puede observar en el caso del sobremaduro, las propiedades mecánicas se van perdiendo, lo cual está relacionado con procesos de degradación de este. Cabe mencionar que las propiedades medidas están altamente relacionadas con las fibras internas, intermedias y externas del culmo del bambú y dependerán de la orientación, distribución y calidad de las

fibras. En este trabajo de tesis se pretende observar con detalle el perfil de densidad del bambú por medio de tomografía de rayos X, para después relacionarlo con las propiedades mecánicas.

| Factor | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|--|
| Edad del culmo | Joven (de 1 a 3 años) | Maduro (de 3 a 6 años) | Sobremaduro (de 6 años en adelante) |
| Resistencia a la tensión (MPa) | 654.67 | 664 | 609.66 |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 26.91 | 26.82 | 26.08 |
| Porcentaje de elongación | 2.43 | 2.5 | 2.33 |

Tabla A. Variación de las propiedades mecánicas.

En general, el culmo está constituido por corteza (cutícula), haces vasculares y células de parénquima. Las proporciones y dimensiones de cada componente varían: entre especies, dentro de la misma especie y dentro de un mismo individuo. Esto influye en la heterogeneidad de su densidad básica, contracciones, contenido de humedad, entre otras propiedades físicas, mecánicas y químicas¹. El conocimiento de las estructuras anatómicas de los culmos permitirá un mejor entendimiento de su comportamiento en los procesos industriales, a los cuales debe ser sometido para llegar a un producto final. Por lo tanto, conocer las características anatómicas permitirá el manejo adecuado del material y a su vez la optimización de los recursos económicos¹.

Las propiedades físicas y los beneficios ambientales del bambú lo convierten en una fuente de materia prima excepcional con una amplia gama de usos y con potencial para la generación de recursos económicos⁷.

Volume Graphics se usa para el análisis y simulación de datos de tomografía industrial y cubre todos los requerimientos relacionados con metrología, detección de defectos, propiedades del material y simulación. En materiales composites se pueden determinar las superficies de los componentes, exportar los resultados de las mediciones, automatizar los procesos de inspección de manera flexible en función del reconocimiento de texto y traducir los datos reales de TC en mallas de volumen para simulación.

El análisis de imágenes mejoradas permite examinar con más detalle la estructura geométrica de celdas unitarias internas del material para la obtención de diferentes propiedades físicas como esfuerzos mecánicos y fenómenos de transporte⁹.

Además, en los últimos años se han desarrollado técnicas avanzadas de tomografía, por ejemplo, para el análisis de materiales inorgánicos, orgánicos y biológicos¹⁰, para la caracterización de poros junto con simulación en matrices de morteros de cemento¹¹, para el estudio de fracturas de concretos In situ y simulación Montecarlo¹², y para el desarrollo de simulaciones de la dispersión y corrección de la tomografía computarizada¹³. Por lo que investigaciones con tomografía computarizada han ayudado a estudiar de una manera más precisa diferentes propiedades físicas de materiales.

Objetivos generales:

- Caracterizar la estructura interna del bambú de 4 especies, que se cultivan en la región de Puebla, por medio de tomografía computarizada de rayos X.

Objetivos particulares:

- Determinar las propiedades mecánicas del bambú (esfuerzos de tensión y compresión) para calcular el módulo de Young.
- Utilizar Tomografía computarizada de rayos X para obtener una reconstrucción tridimensional de la estructura interna del bambú
- Se obtendrá el perfil de densidades por medio de los tomogramas obtenidos del material usando análisis de imagen.
- Determinar experimentalmente la resistencia a la tensión y compresión del bambú, para relacionarlo con su perfil de densidades y su estructura interna (orientación de fibras) obtenidas por TC.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. El bambú.



Figura 1.1. Bambú. Imagen tomada de <http://www.jardineriaon.com>

El uso del bambú en México tiene antecedentes prehispánicos: los totonacas en Veracruz, los huastecos en Hidalgo y Tamaulipas, los aztecas y teotihuacanos en el centro de México, los maya-chontales en Tabasco. Desde entonces ha sido utilizado en la construcción de viviendas especialmente en los climas cálidos-húmedos de los estados de Veracruz, Chiapas y Oaxaca.

Sabemos de los efectos dañinos del calentamiento global, y la necesidad de reforestar millones de hectáreas, así como evitar que se sigan deforestando aquellas selvas que aún existen, efecto negativo que normalmente se lleva a cabo en los países de menor desarrollo industrial, nos obliga a evolucionar los materiales que sustituya la gran

utilización de madera que existe hoy en día, y todo indica que por sus características puede ser el bambú.

Además, el bambú tiene un bajo consumo de energía para su plantación, aunado a que en nuestro país se cuenta con diferentes especies endémicas. Su bajo costo de producción y relativamente corto periodo de crecimiento han despertado el interés en México para promocionarlo, como lo demuestra el 2º Congreso Mexicano del Bambú llevada a cabo en marzo de 2008 en la ciudad de Puebla.

En México existen 8 géneros y 36 especies nativas (que son aquellas que crecen de manera silvestre) de bambúes leñosos, de las cuales 30 son endémicas (es decir, aquellas especies que crecen únicamente dentro del territorio nacional). También se han introducido cerca de 30 especies, principalmente de California y de Colombia¹⁴.

1.1.1. Identificación de las especies.

La guadua es un bambú, que puede alcanzar alturas hasta de 25 metros, con diámetros entre 10 y 20 centímetros, sus entrenudos tienen paredes hasta de 2 centímetros de espesor. El nombre genérico “guadua” derivó del nombre vernáculo o común dado por las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador.

La presencia de espinas en los nudos de tallos y ramas es una característica para distinguir las especies de Guadua de los otros bambúes nativos. Las cinco especies del género Guadua que habitan en México, son las más grandes y frondosas de los bambúes mexicanos. Estas son la Guadua aculeata, la Guadua amplexifolia, la Guadua longifolia, la Guadua paniculata y la Guadua velutina.

La especie de Guadua angustifolia fue descubierta por el botánico alemán Karl Sigmond Kunth en 1822, quien utilizó el vocablo indígena “guadua” como lo llamaban las comunidades nativas de Colombia y Ecuador. Kunth rebautizó la especie con el nombre de Guadua angustifolia, que significa “hoja angosta”⁸. Se caracteriza por una banda blanca bien marcada sobre y en ambos lados de los nudos, hojas caulinares tempranamente caedizas y espinas presentes.

La especie Bambusa oldhamii es probablemente nativa del sur de China que no crece libre por cualquier parte, encontrado sólo bajo cultivo. Puede alcanzar dimensiones de 17 metros de longitud y 13 centímetros de diámetro cuando madura. Los culmos tienen un color verde profundo y soporta temperaturas bajas. Especie útil para la construcción.

La Otatea tiene dos especies, y es el bambú leñoso y nativo de México más abundante en cuanto a sus poblaciones; ocupa grandes superficies en donde muchas

veces es la única planta que crece. *Otatea acuminata* es la especie más utilizada por las poblaciones rurales de México, pues con sus tallos se construye el bajareque (mezcla de tallos de esta especie con lodo y zacate) que sirve como paredes de viviendas tradicionales principalmente en los estados de Jalisco y Veracruz¹⁴.

En este trabajo se estudiaron las siguientes especies:

| NOMBRE CIENTÍFICO | NOMBRE COMÚN |
|----------------------------|----------------|
| <i>Guadua angustifolia</i> | Tarro |
| <i>Bambusa oldhamii</i> | Bambú africano |
| <i>Otatea acuminata</i> | Otate |
| Aún no definido | Ocotate |

Tabla 1.1. Especies del bambú¹⁵.

1.1.2. Taxonomía del bambú.

El bambú es una planta vascular. En el tallo de las plantas vasculares el xilema y el floema (tejidos primarios) se presentan formando cordones denominados haces vasculares.

Xilema proviene del vocablo griego “xylon” que significa madera y floema del vocablo griego “phloios” que significa corteza¹⁶. El xilema y el floema son dos elementos del sistema circulatorio de las plantas. Tanto el xilema como el floema constan de dos partes que se desarrollan una después de otra: protoxilema y metaxilema, y protoxilema y metafloema.

El tejido xilema consta de elementos de vasos, células conductoras, conocidas como traqueidas, y tejido de relleno de soporte, llamado parénquima. Estas células se unen de extremo a extremo para formar tubos largos. Son las gruesas paredes de las traqueidas las que brindan soporte a la planta y le permiten alcanzar alturas impresionantes¹⁷.

En la sección transversal de un tallo de bambú hay dos agujeros grandes (vasos en el xilema; metaxilema) y algunos agujeros pequeños (tubos de tamiz en el floema; metafloema) en el centro¹⁸.

Los haces vasculares observados en *Guadua aculeata* están formados por dos vasos de metaxilema, uno o más vasos de floema, uno o más vasos de protoxilema y un conjunto de fibras que rodean a los elementos conductivos. Los haces cercanos al interior del culmo (Figura 1.2.a) presentan un grupo de fibras rodeando en mayor proporción a los vasos de metaxilema y principalmente al floema, y un grupo menor

rodea al protoxilema, esta distribución de los elementos anatómicos se modifica del interior al exterior del culmo.

En la sección media de la pared del culmo, el conjunto de fibras que rodea al protoxilema aumenta, en algunos casos, hasta igualarse al grupo de fibras que rodea al floema (Figura 1.2.b). Conforme se acerca al exterior del culmo, la mayor proporción de fibras rodea al protoxilema, sin dejar de cubrir los alrededores del floema (figura 1.2.c).

En la zona interna del culmo, los haces vasculares resultaron mayores que los de la zona externa, asimismo se identificó que los espacios vacíos (protoxilema, metaxilema y floema) tenían mayor dimensión, que los haces se encuentran más separados entre sí, y que la proporción de parénquima se incrementa en comparación con el último tercio hacia el exterior del culmo¹.

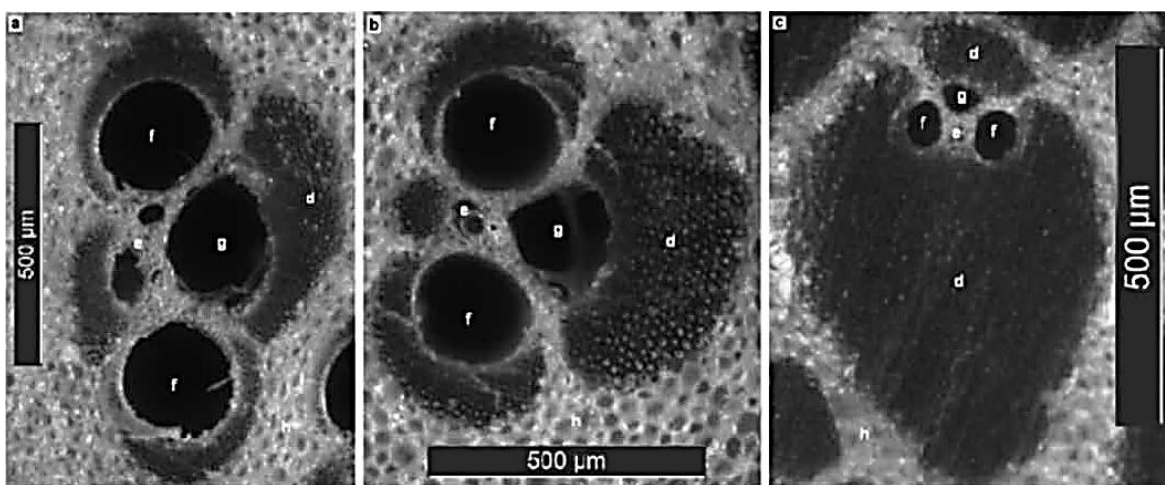


Figura 1.2. Haces vasculares de la sección interior (a), media (b) y exterior (c) del culmo; los tejidos que lo componen son las fibras (d), protoxilema (e), el metaxilema (f), el floema (g), y el parénquima (h)¹.

Investigaciones llevadas a cabo sobre 52 especies de bambúes asiáticos pertenecientes a 14 géneros, señalan que en los culmos de bambú existen diferencias en la estructura de los haces vasculares entre géneros y entre especies. La forma, tamaño, número y concentración de haces vasculares varía desde la periferia hacia la parte interna del culmo y desde la base del culmo hacia el ápice del mismo¹⁹.

El tejido del culmo de la especie *Guadua angustifolia* está compuesto, como en los otros bambúes por: a) corteza, b) células de parénquima, c) fibras y d) haces vasculares los cuales están conformados por células de esclerénquima, vasos (metaxilema, floema, protoxilema) y por tubos cribosos con células acompañantes. Un culmo está conformado en un 52% por tejido de parénquima, en un 40% por fibras y en un 8% por tejido conductivo, estos valores varían con la especie.

En el caso de la especie *Guadua angustifolia* esta composición es: 51% parénquima, 40% fibras y 9% tejido conductivo¹⁹.

A continuación, se describen los tejidos y células que componen el culmo de la especie *Guadua angustifolia*¹⁹:

1.- Corteza. La corteza es la parte externa del culmo y sus funciones son prevenir la pérdida de agua y proteger el tejido. La corteza está compuesta por epidermis e hipodérmis, ver figura 1.3.

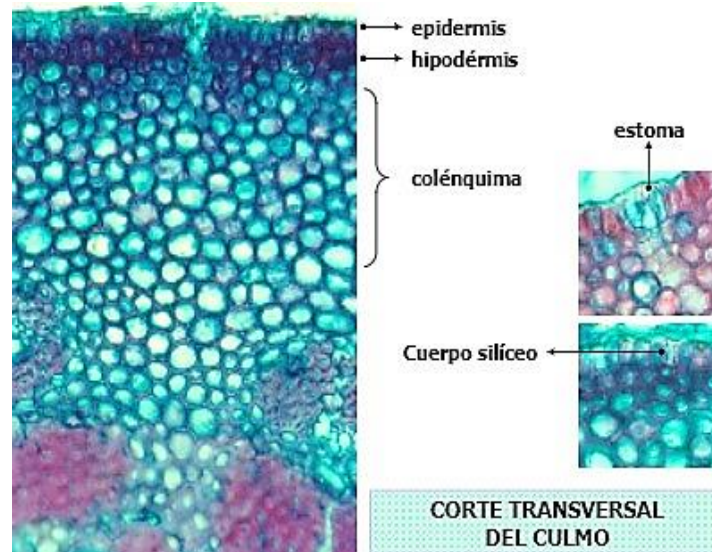


Figura 1.3. Corte transversal del culmo de la especie *Guadua angustifolia*¹⁹.

2.- Parénquima. En un corte longitudinal del culmo (figura 1.4), se observa que el tejido de parénquima está compuesto por células largas y células cortas.

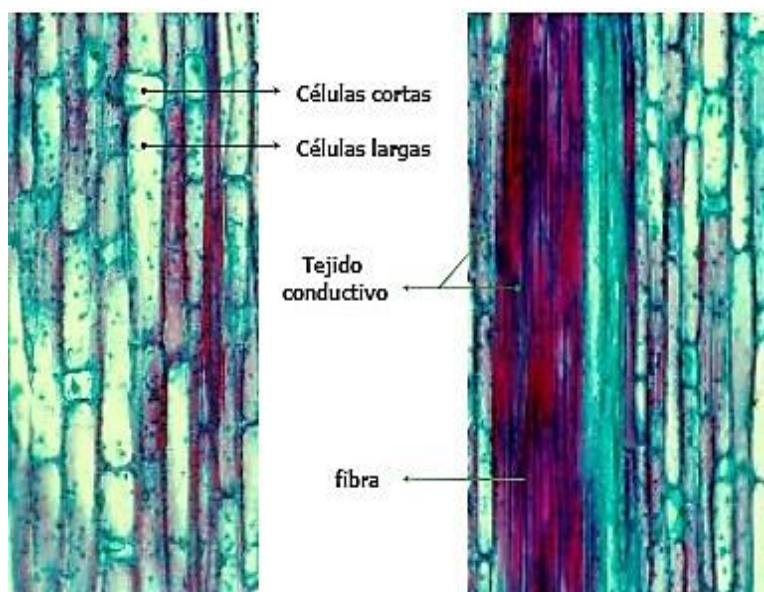


Figura 1.4. Corte longitudinal del culmo de la especie *Guadua angustifolia*¹⁹.

3.- Haces vasculares. Un haz vascular (figura 1.5) de *Guadua angustifolia*, está compuesto por: dos grandes vasos de metaxilema, uno o dos elementos de protoxilema, por el floema y por las vainas de esclerénquima y de fibras (figura 1.6).

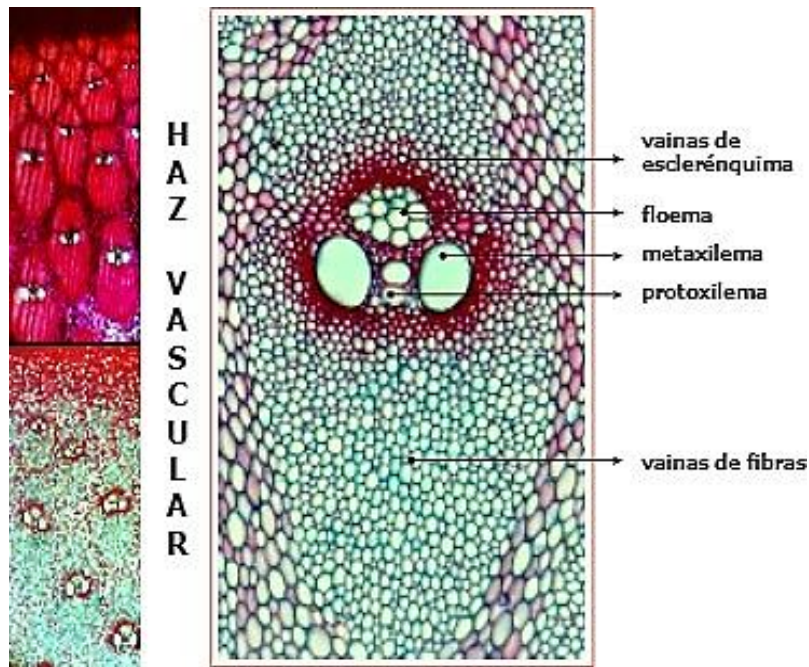


Figura 1.5. Haz vascular de *Guadua angustifolia*¹⁹.

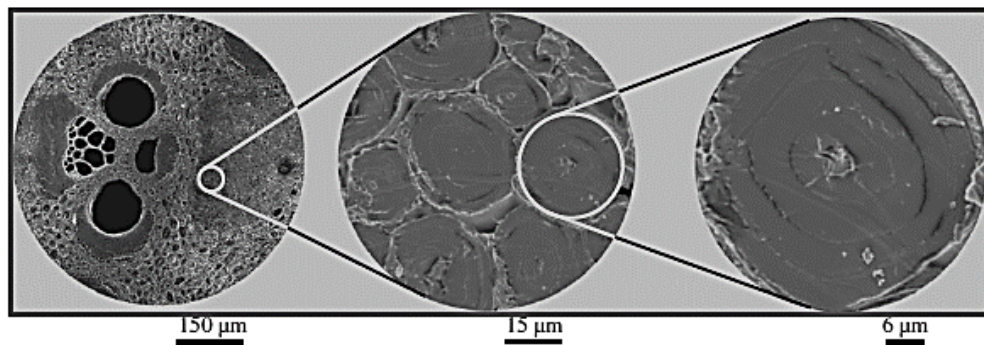


Figura 1.6. Estructura jerárquica de una fibra de bambú²⁰.

Más cerca de la periferia, los haces son más pequeños y más densos. La estructura de las fibras difiere entre las vainas y desde el borde interior hasta la periferia. En la figura 1.7 se exhiben las micrografías de los haces de fibras en el borde interior, el grosor medio y la periferia²⁰.

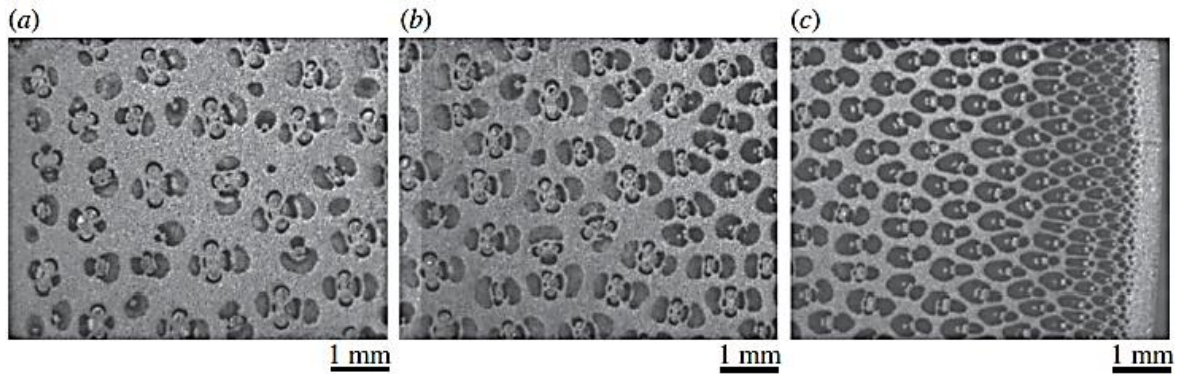


Figura 1.7. Micrografías de la sección transversal del bambú. Distribución de las fibras en la sección (a) interior, (b) media, y (c) exterior²⁰.

La estructura de la pared celular secundaria multilamelar de una fibra ha sido presentada por Parameswaran & Liese²⁰. La estructura se muestra en la figura 1.8. A partir de la laminilla media, la pared celular primaria y una capa de transición S_0 , los ángulos de microfibrilla alternan entre valores cercanos a 0° en la laminilla gruesa y 90° en las delgadas.

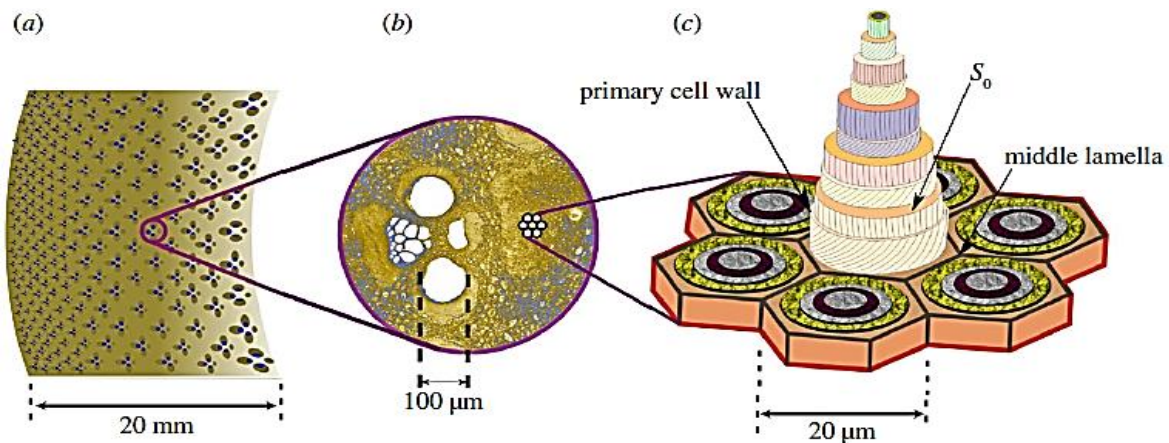


Figura 1.8. Una ampliación del haz vascular (a) es mostrada en (b), y (c) muestra la orientación de las microfibrillas de la celulosa en la dirección axial²⁰.

4.- Metaxilema. Consta de dos grandes vasos separados por tejido de parénquima, entre los cuales hay un espacio intercelular. Los vasos del metaxilema están rodeados por células de parénquima lignificadas, sin embargo, el parénquima alrededor del espacio intercelular permanece siempre sin lignificar. Las células del parénquima que rodean el haz vascular generalmente son más pequeñas que las del tejido grueso o parenquimatoso y poseen más orificios en sus paredes. El tamaño y

área de los vasos de metaxilema son determinantes en la conductividad del agua en los bambúes.

5.- Floema. Consta de tubos cribosos grandes de paredes delgadas y sin lignificar, siempre conectados con células acompañantes. En la especie *Guadua angustifolia* el floema se compone de 14 - 25 tubos cribosos.

6.- Vainas de esclerénquima. En el haz vascular el tejido conductivo (floema y xilema) está rodeado por vainas de esclerénquima, las cuales difieren en tamaño, forma y ubicación según la especie y la posición dentro del culmo. Los haces vasculares de la parte central e interna de la pared del culmo presentan 4 vainas de esclerénquima, una a cada lado de los vasos del metaxilema, uno alrededor del floema y el otro alrededor del espacio intercelular. Además de las cuatro vainas de esclerénquima, la mayoría de las especies de bambúes presentan haces de fibras arriba y abajo del haz vascular central. En la especie *Guadua angustifolia*, las vainas de fibras del protoxilema, metaxilema y floema de la parte media e interna de la pared del culmo no se tocan entre sí, mientras que en las zonas de periferia y transición se amalgaman entre sí encerrando el tejido conductivo.

1.2. Micro TC.

La tomografía computarizada (TC) de rayos X es una técnica de exploración radiográfica no destructiva²¹ que permite la visualización y evaluación dimensional de las características internas y externas de una pieza de trabajo. Por lo tanto, es una alternativa atractiva para las tareas de medición que resultan problemáticas para los instrumentos ópticos y táctiles convencionales.

La salida de datos de una medición de TC es un volumen de enteros de valor de gris que describen la distribución del material de la pieza escaneada; el espaciado relativo de los elementos de volumen (voxels) se denomina tamaño de vóxel e influye en toda la información dimensional evaluada a partir de un conjunto de datos de TC. El tamaño del vóxel se define por la posición de una pieza de trabajo en relación con la fuente de rayos X y el detector, y, por lo tanto, es propenso a errores de posición del eje, y errores en la alineación geométrica del hardware del sistema de TC.

El proceso de medición de TC de rayos X se puede resumir de la siguiente manera: una fuente de rayos X emite un haz cónico de rayos X que se atenúan a medida que se propagan a través de una pieza de trabajo; los rayos X que penetran completamente en la pieza de trabajo inciden en un detector de panel plano, cuya salida es una imagen de transmisión, denominada proyección.

Se hacen proyecciones para múltiples posiciones angulares de la pieza de trabajo; a partir de estas proyecciones, se calculan imágenes de sección transversal de la pieza. Las imágenes de la sección transversal, denominadas imágenes de TC, describen la distribución de la densidad del material de la pieza en el plano considerado. El proceso de cálculo de imágenes de TC a partir de proyecciones se denomina reconstrucción. Las imágenes de TC individuales se pueden visualizar como imágenes de valor de gris, o bien se pueden "apilar" varias imágenes de TC, formando así un volumen de TC, en el que los píxeles tridimensionales se denominan voxels.

Para una pieza de trabajo hecha de un solo material, los voxels pertenecerán a la pieza de trabajo o al aire; para evaluar la información dimensional de un volumen de TC, deben identificarse los puntos en los que los voxels hacen la transición del aire a la pieza de trabajo, es decir, se debe definir la posición de la superficie de la pieza de trabajo; esto se denomina determinación de la superficie. La determinación de la superficie se realiza normalmente mediante una operación de umbral global de valores de gris, en la que se selecciona un solo valor de gris de modo que los vóxeles con valores de gris superiores al umbral pertenecen a la pieza de trabajo, y los vóxeles con valores de gris inferiores al umbral pertenecen al aire.

La salida de datos de la determinación de la superficie es un conjunto de coordenadas x,y,z , que describen la posición de la superficie de la pieza de trabajo; estas coordenadas de superficie se utilizan para evaluar las dimensiones de la pieza. El flujo de trabajo (figura 1.9) para una tomografía computarizada de rayos X se sintetiza de la siguiente manera:

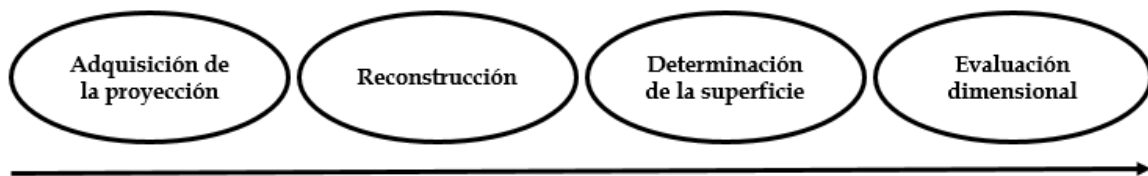


Figura 1.9. Flujo de trabajo para una tomografía²² de rayos X.

1.2.1. Generación de rayos X.

Los rayos X se generan cuando las partículas cargadas se aceleran o cuando en un átomo los electrones pasan de un orbital a otro. La figura 1.10 muestra un esquema de un tubo de rayos X, fuente utilizada en los sistemas de micro TC. Los electrones fluyen a través de un filamento (generalmente de tungsteno) a un potencial kVp con relación al objetivo (generalmente un metal como Cu, Mo, Ag o W).

Los electrones son emitidos termoiónicamente desde el filamento y se aceleran hacia el objetivo bajo el efecto del potencial. Al alcanzar el objetivo, los electrones se desaceleran, produciendo (a) Bremsstrahlung o espectro continuo o (b) radiación característica. Los rayos X pasan a través de una abertura y un filtro.

La radiación característica surge de las transiciones electrónicas generadas por los electrones incidentes, y los picos de alta intensidad tienen un rango de energía muy estrecho. A medida que aumenta el potencial a través del tubo, aumentan las intensidades de ambos tipos de radiación y el pico del espectro continuo cambia a energías más altas. Solo una fracción muy pequeña de la energía del haz de electrones se convierte en radiación y la mayor parte de la energía se libera como calor²².

La limitación adicional de la intensidad de rayos X que está disponible para la obtención de imágenes es el hecho de que los rayos X se emiten en todas las direcciones (figura 1.10) y la mayoría nunca encuentran la muestra.

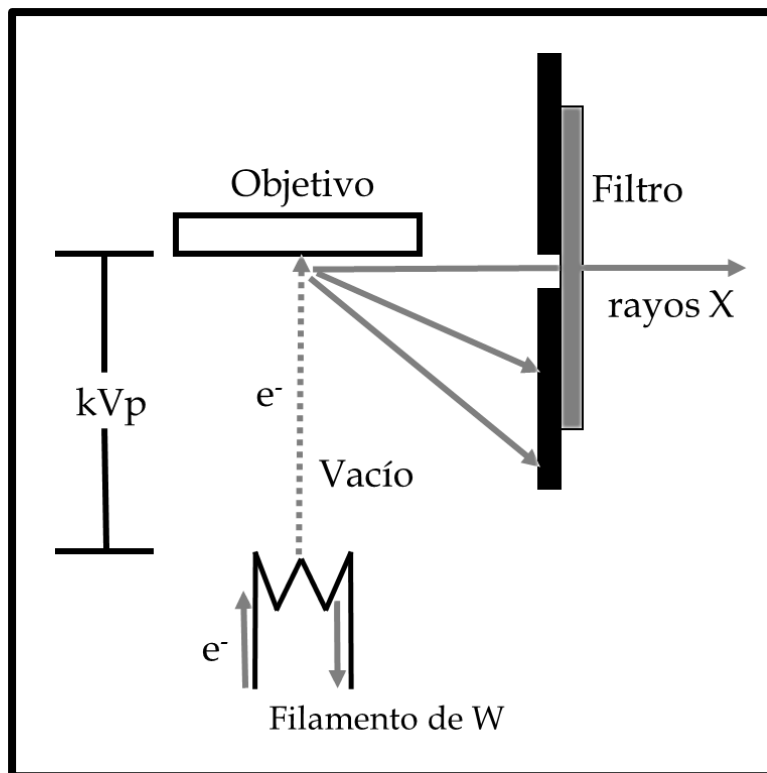


Figura 1.10. Diagrama esquemático de un tubo de rayos X con electrones que fluyen a través de un filamento de W, emitidos térmicamente desde el filamento y acelerados dentro de un vacío por un potencial kVp. Los rayos X pasan a través de una abertura y un filtro²².

1.2.2. Interacción con la materia.

Como descubrió Röntgen²², la atenuación de los rayos X de la longitud de onda λ se da para un objeto homogéneo mediante la ecuación:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad \text{Ec. (1.1)}$$

donde I_0 es la intensidad del haz de rayos X no atenuado, e I es la intensidad del haz después de que atraviesa un espesor de un material (x), caracterizado por un coeficiente de atenuación lineal μ [cm^{-1}].

Reescribiendo la ecuación 1.1 en términos del coeficiente de atenuación de masa μ/ρ (unidades cm^2/g) y la densidad ρ (unidades g/cm^3) reconoce explícitamente que la base fundamental de la cantidad de atenuación es el número de átomos encontrados por el haz de rayos X:

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x\right] \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Los coeficientes de atenuación de masa son una propiedad de los materiales y son una función importante del número atómico (Z), así como de la longitud de onda (λ) de los rayos X (la inversa de la energía).

Los valores del coeficiente de atenuación lineal de cualquier mezcla o compuesto pueden calcularse para una energía particular a partir de los primeros principios utilizando coeficientes de atenuación de masa para los elementos y densidades para las fases presentes o la densidad del compuesto en cuestión. Específicamente, el coeficiente de atenuación lineal de la mezcla o compuesto es igual a:

$$\langle \mu \rangle = \sum (\mu/\rho_i)\rho_i \quad \text{Ec. (1.3)}$$

Es decir, el promedio ponderado por fracción de peso.

El comportamiento de atenuación de algunos materiales se visualiza en la figura 1.11.

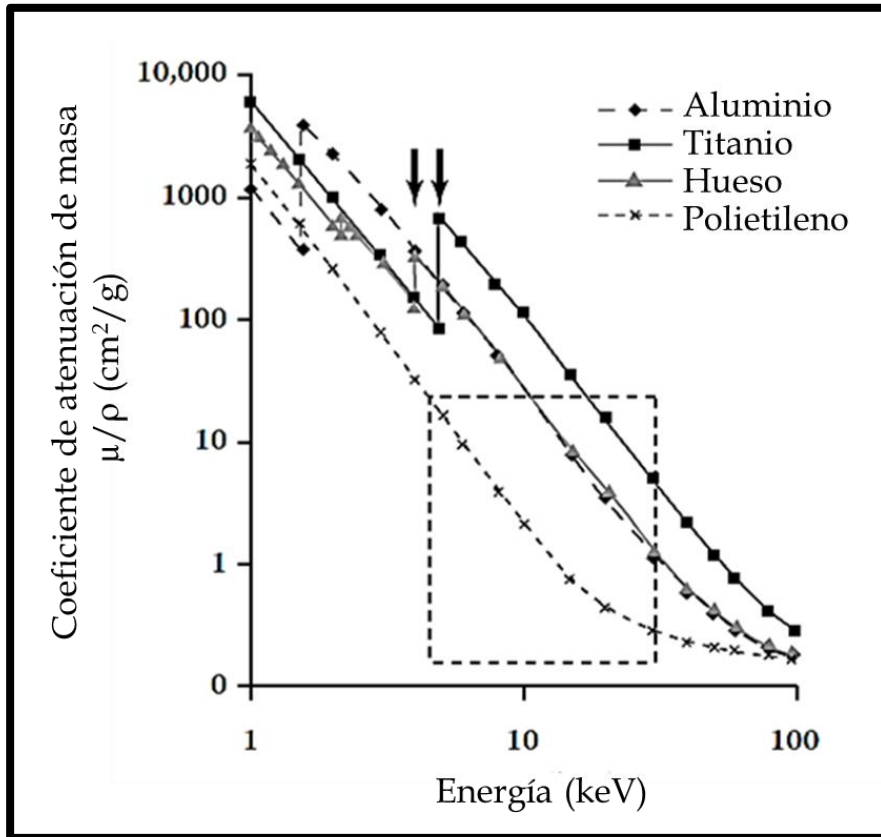


Figura 1.11. Gráfico log-log de μ/ρ en función de la energía del fotón de rayos X para 4 materiales: aluminio, titanio, hueso cortical, y polietileno.

El rectángulo delimitado por la línea discontinua indica de manera muy aproximada los rangos de las dos variables que se encuentran con mayor frecuencia en la micro TC.

1.2.3. Imágenes.

La visibilidad de las características de la estructura interna de un material dependen de la sensibilidad al contraste y de la resolución espacial del equipo de tomografía computarizada utilizado. La resolución espacial describe qué tan bien se pueden obtener imágenes con más detalles o se pueden ubicar pequeñas características con respecto a algún punto de referencia²².

La figura 1.12 presenta el efecto del contraste de un objeto donde el fondo y los pares de puntos negros son indistinguibles conforme disminuye el contraste, mientras que cuando existe un contraste muy alto solamente se obtienen las propiedades de los pares de puntos (sobresaturación de la imagen).

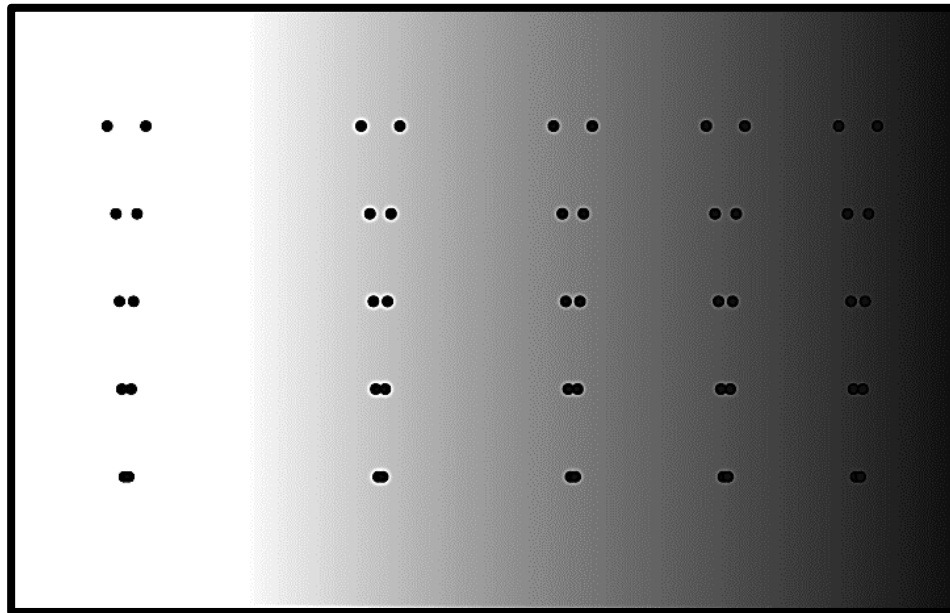


Figura 1.12. Efecto del aumento del contraste entre 2 señales específicas, punto negro y fondo (pantalla).

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Materiales.

En este trabajo de tesis se utilizaron especies de bambú que fueron obtenidas en diferentes regiones de la república mexicana: *Guadua angustifolia* de Chiapas, *Bambusa oldhamii* de la sierra Norte de Puebla, *Otatea acuminata* de Guerrero y el *Ocotate* de la Mixteca Poblana, con un rango de edad entre los 5 y 7 años. En la figura 2.1 se exhiben las muestras representativas que se utilizaron en este trabajo.

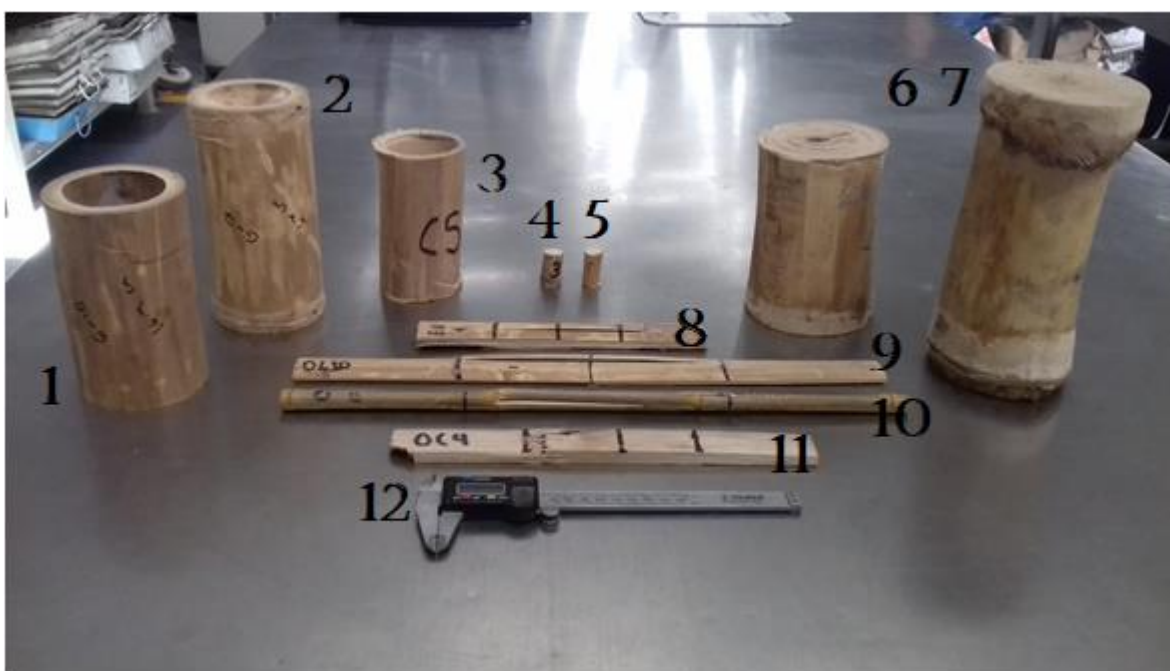


Figura 2.1. Muestras de *Guadua*: 1, 2 y 8. Muestras de *Oldhamii*: 3 y 9. Muestras de *Otatea*: 4, 5, y 10. Muestras de *Ocotate*: 6, 7 y 11. Vernier digital: 12.

2.2. Propiedades mecánicas.

El funcionamiento de la máquina universal se inicia al encender un interruptor, el cual da movimiento al cabezal móvil, permitiendo ajustar la probeta ya sea subiendo o bajando el cabezal. Posteriormente se prende un motor que mueve una bomba de desplazamiento positivo, la bomba inyecta aceite al pistón, al introducir aceite al pistón, este ejerce una fuerza hacia arriba, lo que posibilita al cabezal móvil moverse.

Hay dos válvulas: una de carga y una de alivio. Al abrir la válvula de carga (perilla), deja pasar aceite aumentando su presión, este aceite circula hasta llegar a un tubo de Bourdon, al aumentar la presión se desdobra el tubo, convirtiendo la presión en desplazamiento. Puesto que el desplazamiento del tubo de Bourdon es una función de la presión aplicada, esta puede ser amplificada e indicada por medio de una aguja en un dial. Para saber cuánto se va a deformar el material al aplicar la carga se utiliza un extensómetro de carátula o micrómetro, que indica la deformación de la probeta. Por otra parte la válvula de alivio libera la presión, evitando la explosión por exceso de presión en el sistema o falla del equipo.

Todas las máquinas universales tienen 2 secciones: 1) sección de pruebas y 2) sección de control, ver figura 2.2. La sección de pruebas es el lugar donde se colocan las probetas y se realizan los ensayos. En esta sección se encuentran dos cabezales: uno fijo y uno móvil. En la parte superior del cabezal móvil se realizan las pruebas de tensión y en la parte inferior del mismo se realizan las pruebas de compresión. En la sección de control se rigen parámetros como la carga, el porcentaje de deformación, y la velocidad del ensayo.



Fig. 2.2. Máquina universal. 1) sección de pruebas, 2) sección de control.

Para determinar algunas propiedades mecánicas se utilizó el equipo prensa universal marca Riehle con capacidad de carga de 25 t en el manómetro "A" con divisiones a cada 50 kg y capacidad de carga de 5 t en el manómetro "B" con divisiones a cada 10 kg, con lo que hará posible obtener la resistencia a la tensión y compresión del bambú.

Equipo adicional para los ensayos de tensión y compresión:

- Calibrador tipo vernier digital.
- Mordazas de media caña, triangulares y planas (figura 2.3).
- Flexómetro.
- Placas para mordaza.
- Báscula digital.
- Extensómetro de carátula con constante de 0.001 pg.
- Extensómetro de carátula con constante de 0.002 mm.



Figura 2.3. Placas para mordazas tipo: 1) media caña, 2) triangular, y 3) plana.

2.2.1. Prueba de tensión.

Para cada una de las pruebas de tensión se realizó el siguiente procedimiento:

- ◆ Se recopilan datos del espécimen como son el espesor, diámetro, peso y longitud, dependiendo del tipo de bambú.
- ◆ Se marca una longitud base del centro a los extremos.
- ◆ Se colocan las mordazas en la prensa universal y, dependiendo del tipo de espécimen, se coloca el tipo de mordaza y las placas de ajuste.
- ◆ En la parte superior del cabezal móvil se coloca el espécimen, sujetándolo justo de las marcas de la longitud base, a manera de que quede bien arriostada la probeta con las mordazas, para que el espécimen no se deslice en el momento de realizar el ensayo.

- ◆ Una vez encendida la prensa universal se ajusta la aguja girando la perilla a la derecha hasta coincidir en la lectura de carga cero (0).
- ◆ Se procede a colocar el micrómetro ajustándolo en cero (0).
- ◆ Se aplica la carga de manera constante dependiendo del espécimen, en cada carga controlada se toma lectura del micrómetro y se registran lecturas hasta que el espécimen falle.
- ◆ Una vez alcanzada la falla se descarga la prensa y se desmonta el espécimen.
- ◆ Se verifica si la longitud base tuvo deformación.

Como resultado de los experimentos realizados se obtuvo la máxima carga soportada así como la lectura del micrómetro (distancia máxima de elongación), con estos datos se construye la gráfica esfuerzo vs. deformación.

Tomando en cuenta este procedimiento general y siguiéndolo de manera adecuada, se puede llegar a resultados óptimos y favorables.

2.2.2. Prueba de compresión.

Para cada una de las pruebas de compresión se siguió el mismo procedimiento utilizado en las pruebas de tensión. La única diferencia entre la prueba de tensión y la de compresión es la ubicación de la probeta para realizar el ensayo. La prueba de compresión se realiza en la parte inferior del cabezal móvil.

2.2.3. Relación tensión-deformación.

La relación entre tensión y deformación de un material se determina experimentalmente mediante ensayos o pruebas de laboratorio. Los ensayos más simples de realizar son los de tensión o compresión sobre probetas cilíndricas o prismáticas normalizadas. Estos ensayos se realizan aplicando una fuerza P en los extremos de la probeta en dirección de su mismo eje. Llamando a A como el área inicial de la sección transversal de la probeta, se define como tensión nominal (σ) a la relación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Por otro lado, si L es la longitud calibrada de la probeta y ΔL el alargamiento de ésta producida por la fuerza axial, se define la deformación axial nominal (ϵ) como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

El ensayo se realiza aumentando progresivamente la fuerza aplicada de forma lenta y gradual, midiendo los alargamientos axiales. A partir de los conjuntos de valores ($P, \Delta L$) obtenidos, se calculan los correspondientes conjuntos de valores de tensión deformación nominales (σ, ϵ). Los pares (σ, ϵ) se representan en una curva que se denomina curva esfuerzo - deformación del material.

Una curva típica de esfuerzo-deformación, como la presentada en la figura 2.4, depende de varios factores (velocidad de la aplicación de la carga, temperatura, dispositivo experimental empleado, material, etc.) por lo que los ensayos deben realizarse de forma normalizada, con equipos estandarizados y en condiciones controladas. De esta forma se consigue que los resultados de esfuerzos al material sean relacionados exclusivamente con la estructura interna característica del material ensayado²³.

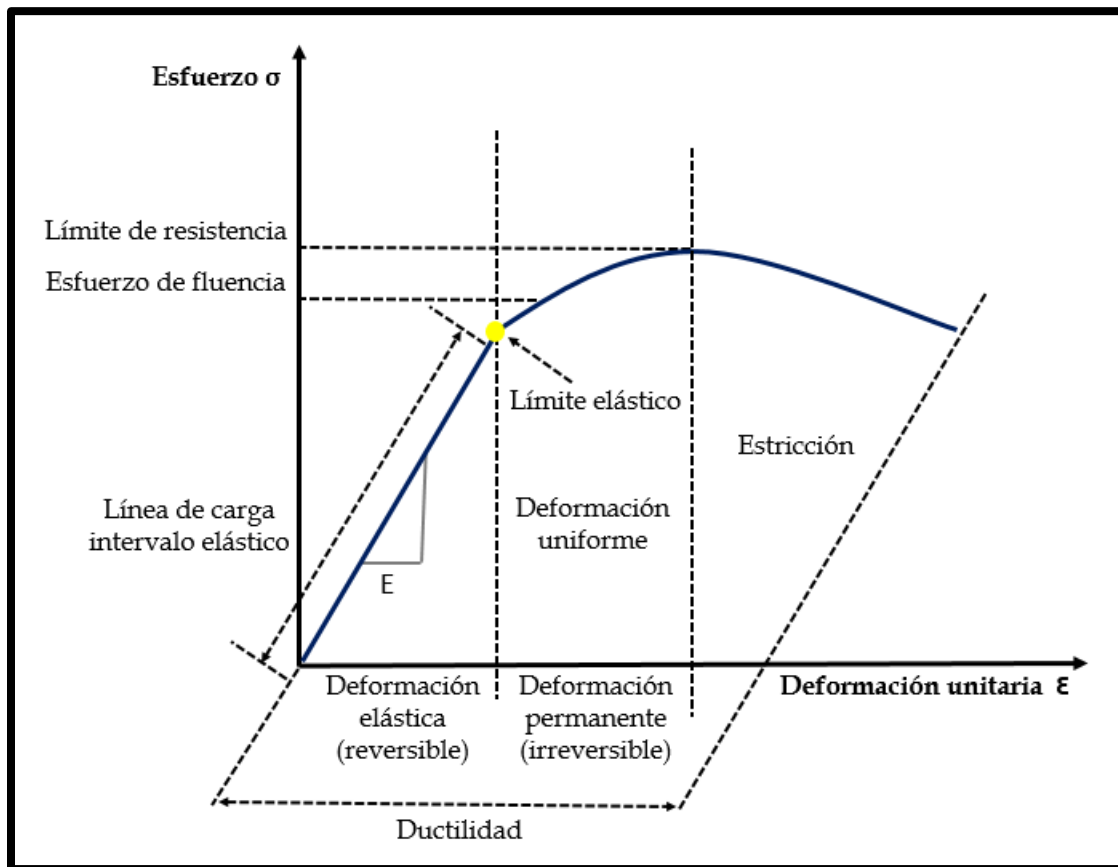


Figura 2.4. Curva esfuerzo - deformación.

Al incrementar la carga más allá del límite elástico, la deformación empieza a aumentar más rápidamente para cada incremento en esfuerzo. A partir de este punto se presenta un alargamiento considerable, ya que el material se vuelve plástico.

Esta deformación se conoce como cedencia o fluencia del material (es la deformación irre recuperable de la probeta), a partir de la cual solo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a la deformación elástica, quedando una deformación irreversible. Este fenómeno se sitúa justo encima del límite elástico.

2.3. Tomografía.

La tomografía computarizada (TC) de rayos X, es una técnica experimental no destructiva, es decir, el material puede seguir utilizándose en su función específica. En esta investigación se empleará la técnica de TC de rayos X para caracterizar la estructura interna del bambú. En particular se cuantificará la distribución de densidad del bambú en las direcciones radial y longitudinal, y especificará la diferencia del perfil de densidades en los entrenudos.

Micro TC funciona por medio de un tubo de rayos X, donde los rayos X son generados mediante electrones termoemitidos de un filamento incandescente (efecto termoiónico), los cuales son acelerados con un alto voltaje (mínimo de 20 kV) produciendo que el haz de electrones alcance velocidades de hasta el 80% de la velocidad de la luz. Se redirige por medio de una lente magnética hacia un objetivo metálico que, al desacelerar repentinamente los electrones, cuando chocan con el objetivo metálico producen calor y rayos X, estos emanan de la región donde el haz de electrones choca con el objetivo. Cuando los rayos X atraviesan el material (o muestra) se proyecta una imagen (2D) que se registra en un detector basado en una matriz de un arreglo de fotodiodos de silicio amorfo, es decir, se produce una radiografía que es llamada comúnmente sección, corte o tomograma (figura 2.5). La muestra gira en una base conforme se está irradiando con rayos X, con esto se logran tener tomogramas a diferentes ángulos. Por medio de análisis matemáticos (usualmente se utiliza la transformada de Radon) se integran todas estas imágenes o los distintos planos (o secciones) obteniendo una reconstrucción 3D que es una representación aproximada de la estructura interna real del material²⁴.

TC es una técnica que mide contrastes en la densidad de compositos, de hecho, un composito está construido por diferentes compuestos y cada uno de ellos tiene un coeficiente de atenuación de masa que depende de la energía del fotón incidente.



Figura 2.5. Tomograma. Especie *Guadua angustifolia*

Por lo tanto, la sensibilidad de una TC es de suma importancia para hacer un mejor diagnóstico de los diferentes compuestos que tiene un material. Por ejemplo, para un material poroso tendremos zonas del material con un coeficiente de atenuación de masa muy pequeño (caso del aire) y otras zonas con un coeficiente de atenuación de masa grande (sólido), por lo que se observará un alto contraste en la imagen tomográfica en diferentes zonas. El problema aparece en las diferentes zonas dentro del compuesto que tienen un coeficiente de atenuación de masa similar, en este caso se observará muy bajo contraste, por lo que se dificulta realizar un buen diagnóstico en dicha zona.

El análisis de los datos de tomografía computarizada de estructuras de fibra conduce a una contribución esencial para el control de calidad y para la factibilidad de simulaciones importantes sin destruir la pieza, con este análisis es posible comparar la estructura interna real con la simulada. Se utilizan las orientaciones reales para simulaciones aún más precisas³.

Para el análisis de la densidad del bambú en las direcciones longitudinal y radial, se puede calcular mediante la medición en escala de grises de las imágenes de la muestra mediante el método propuesto por Huang³ el cual se describe a continuación: en este estudio, se utiliza un escáner Nikon XT H 225 CT para cuantificar la densidad de la muestra de los bambúes a estudiar. Este equipo genera imágenes en escala de grises.

Bajo estas condiciones, la relación lineal entre el valor de la escala de grises y el valor de densidad de la muestra se puede describir mediante la ecuación lineal:

$$\rho = AGs + B \quad (2.3)$$

Donde:

ρ es la densidad (kg/m^3), A es la pendiente de la recta y B es una constante, Gs es la escala de grises relacionada a una imagen tomográfica de rayos X.

El valor de la escala de grises se calibra escaneando al menos dos densidades conocidas, que en este caso se propusieron el agua destilada y polipropileno (PP Homopolímero) de alta densidad. Las densidades aparentes de estos materiales son conocidas. Sin embargo, esta relación lineal solo es aplicable cuando se realiza al mismo tiempo el escaneo con los 2 materiales de referencia y el bambú. La calibración debe realizarse en todo momento escaneando materiales de referencia de densidad aparente conocida. El software de procesamiento de ImageJ nos ayudará para medir la escala de grises de la imagen del escaneo por TC. Con este procedimiento se puede obtener una gráfica de la densidad respecto al nivel de grises de los escaneos tomográficos y que será ajustada por la ecuación 2.3.

Hay limitaciones en la técnica de escaneo TC. Para obtener una resolución aceptable para la cuantificación de la densidad, el volumen de la muestra debe restringirse a un tamaño relativamente pequeño, mientras que el tiempo de exploración debe ser el mayor posible. Los parámetros de escaneo influirán en los resultados³.

El equipo de tomografía de rayos X es un Nikon Metrology dual-source 225 kV and 450 kV M1 CT X-ray Inspection System. Este equipo tiene una resolución mínima de

3 μm para el cañón de rayos X 225 kV y 25 μm para el de 450 kV, y puede soportar muestras de hasta 100 kg. Todo el sistema se encuentra en una cabina asegurada (de 8 m^3) por paredes de plomo de 6 pulgadas de espesor y tiene un peso de alrededor 20 toneladas.

Los parámetros de exploración utilizados son los siguientes:

- Voltaje 152 kV
- Corriente 100 μA .
- Potencia: 15.2 W.
- Exposición: 1fps.
- Sin filtro.
- Tiempo aproximado 16:55 minutos,
- 1001 imágenes.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados relacionados con medidas de tensión y compresión sobre las muestras de bambúes, con el fin de obtener el módulo de Young. Además, se presentarán las tomografías realizadas para cada especie de bambú y se mostrará el análisis de imágenes llevado a cabo para la obtención del perfil de densidades así como la descripción de las fibras y el número de haces vasculares. Por último, se hará una comparación de las propiedades estructurales del bambú (densidad), obtenidas por tomografía, con las medidas experimentales de tensión y compresión.

3.1. Propiedades mecánicas.

Para las medidas experimentales de tensión y compresión de los bambúes se tomaron un total de 85 muestras ver tabla 3.1, de las cuales están agrupadas de la siguiente manera:

| Especie | Pruebas de tensión | | Pruebas de compresión | |
|--------------------------------------|--------------------|----------|-----------------------|----------|
| | Con nudo | Sin nudo | Con nudo | Sin nudo |
| <i>Guadua angustifolia</i> | | 8 | 5 | 5 |
| <i>Bambusa oldhamii</i> | | 13 | | 13 |
| <i>Otatea acuminata</i> | 11 | | 6 | 5 |
| Ocotate (nombre común de la especie) | 11 | | 4 | 4 |

Tabla 3.1. Clasificación de muestras experimentales.

3.1.1. Pruebas de tensión de la especie *Guadua angustifolia*.

La forma más usada para medir la elongación en un ensayo de tensión o compresión en una máquina universal, es a través del desplazamiento del cabezal móvil, mediante un extensómetro de carátula colocado en la parte inferior del cabezal. Antes de iniciar el ensayo se sitúa la probeta entre el cabezal móvil y el fijo quedando supuestamente bien arriostrada, al iniciar el ensayo el extensómetro mide el desplazamiento del cabezal móvil, suponiendo que ese desplazamiento es lo que se elonga la probeta.

Se analizaron 8 probetas (cortes) sin nudo (figura 3.1.A) de la especie *Guadua angustifolia*, con secciones circulares de 1/8. Una vez realizada la tensión sobre las probetas, estas se deforman (o existe ruptura de las fibras) en una máxima tensión, ver figura 3.1.B. En la tabla 3.2 se muestra la máxima carga soportada por cada una de las probetas:

| Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Tensión (kg/cm ²) | Tensión (MPa) |
|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 3,450 | 3.39 | 1015.54 | 99.58 |
| 2 | 2,450 | 2.89 | 847.66 | 83.12 |
| 3 | 3,350 | 3.15 | 1061.39 | 104.08 |
| 4 | 2,700 | 3.53 | 764.62 | 74.98 |
| 5 | 2,670 | 2.64 | 1010.18 | 99.06 |
| 6 | 3,550 | 3.4 | 1042.40 | 102.22 |
| 7 | 3,300 | 3.47 | 950.04 | 93.16 |
| 8 | 3,090 | 3.94 | 784.16 | 76.89 |

Tabla 3.2. Máxima carga total soportada para el ensayo de tensión de la especie *Guadua angustifolia*.

Se obtiene un promedio de máxima carga soportada de $3,070 \pm 411.92$ kg. Las probetas 1, 2 y 3, son ensayos de referencia para observar la carga máxima soportada, no se hicieron medidas sistemáticas. Para el estudio de esfuerzo a la tensión vs. deformación se utilizaron 5 probetas: 4, 5, 6, 7 y 8 de la tabla 3.2.

Una de las dificultades técnicas encontradas en la realización de estos experimentos es el deslizamiento de la probeta en las mordazas, por lo que fue necesario probarlas y utilizar la que más se adaptara a la probeta. Se utilizaron las mordazas de sección transversal plana por tener una mayor adherencia con la probeta.

A una carga óptima de 500 kilogramos aseguramos que la muestra no se barra o se deslice de la mordaza. La fractura se origina en la parte inferior de la probeta es decir cercana a la mordaza, como se muestra en la flecha de la figura 3.1.B.

Ahora bien, una vez realizada la medición es importante tomar algunos parámetros experimentales (ver tabla 3.3) como: el área de la sección transversal del bambú, la lectura del desplazamiento longitudinal que soporta el bambú por medio de la lectura del extensómetro y la carga aplicada en kg. A partir de estos parámetros se pueden determinar las curvas de esfuerzo contra deformación.

El área de la sección transversal de la probeta del bambú *Guadua angustifolia* se calculó por medio del área de un trapecio circular (ver figura 3.1.C):

$$A = \frac{\widehat{AB} + \widehat{CD}}{2} * h \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde \widehat{AB} , \widehat{CD} son los segmentos de la longitud mayor y menor respectivamente, y h es el espesor.

El desplazamiento d del bambú se midió con el extensómetro de carátula con resolución de 0.001 pg. La deformación se obtiene por la siguiente expresión:

$$\text{deformación (elongación)} = \epsilon = \left| \frac{L_f - L_o}{L_o} \right| = \left| \frac{d}{L_o} \right| \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde L_o es la longitud inicial y L_f es la longitud final después de la carga. De estos parámetros se obtiene el esfuerzo (σ) y el módulo de elasticidad (E) por medio de la siguiente expresión :

$$E = \frac{\partial(\text{Carga}/\text{Área})}{\partial \epsilon} = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

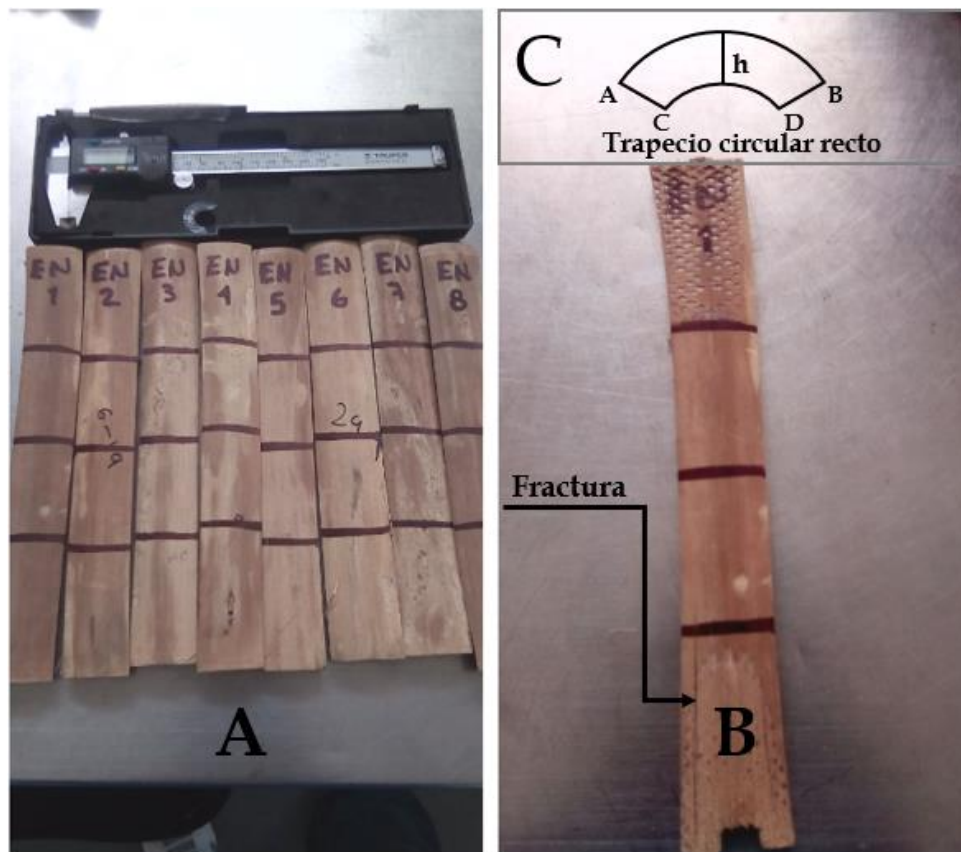


Figura 3.1. A) Probetas de Guadua angustifolia para realizar pruebas de tensión, B) probetas de Guadua angustifolia después de realizar la prueba de tensión, C) área de un trapezio circular.

| PRUEBA PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|--------|
| DATOS DEL ESPÉCIMEN | | | | | |
| MUESTRA: | GUADUA 4 | SECCIÓN (cm ²) | 3.53 | CARGA RUPTURA (Kgf): | 2700 |
| LONGITUD EXT. (cm) | 3.3388 | VOLUMEN (cm ³) | 80.50 | RESISTENCIA (Kgf/cm ²): | 764.66 |
| LONGITUD INT. (cm) | 3.0911 | PESO (g) | 35 | PRECARGA: | 405 |
| ESPESOR (cm) | 1.0983 | PESO VOLUMÉTRICO (kg/cm ³) | 0.000434 | CARGA DE ENSAYE: | 1620 |
| LARGO PROBETA (cm) | 22.8 | LINEA BASE (mm) | 100 | | |
| DATOS DE ENSAYE | | | | | |
| CARGA (kg) | LECTURA DEL MICRÓMETRO adimensional | DESPLAZAMIENTO (mm) | σ kg/cm ² | ϵ adimensional | |
| 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 100 | 45 | 1.14 | 28.32 | 0.01 | |
| 200 | 170 | 4.32 | 56.64 | 0.04 | |
| 300 | 270 | 6.86 | 84.96 | 0.07 | |
| 400 | 345 | 8.76 | 113.28 | 0.09 | |
| 500 | 430 | 10.92 | 141.60 | 0.11 | |
| 600 | 510 | 12.95 | 169.92 | 0.13 | |
| 700 | 605 | 15.37 | 198.25 | 0.15 | |
| 800 | 690 | 17.53 | 226.57 | 0.18 | |
| 900 | 770 | 19.56 | 254.89 | 0.20 | |
| 1000 | 825 | 20.96 | 283.21 | 0.21 | |
| 1100 | 875 | 22.23 | 311.53 | 0.22 | |
| 1200 | 920 | 23.37 | 339.85 | 0.23 | |
| 1300 | 970 | 24.64 | 368.17 | 0.25 | |
| 1400 | 990 | 25.15 | 396.49 | 0.25 | |
| 1500 | 1017 | 25.83 | 424.81 | 0.26 | |
| 1600 | 1055 | 26.80 | 453.13 | 0.27 | |
| 1700 | 1080 | 27.43 | 481.45 | 0.27 | |
| 1800 | 1110 | 28.19 | 509.77 | 0.28 | |
| 1900 | 1138 | 28.91 | 538.09 | 0.29 | |
| 2000 | 1160 | 29.46 | 566.42 | 0.29 | |
| 2100 | 1186 | 30.12 | 594.74 | 0.30 | |
| 2200 | 1210 | 30.73 | 623.06 | 0.31 | |
| 2300 | 1230 | 31.24 | 651.38 | 0.31 | |
| 2400 | 1250 | 31.75 | 679.70 | 0.32 | |
| 2500 | 1275 | 32.39 | 708.02 | 0.32 | |
| 2600 | 1295 | 32.89 | 736.34 | 0.33 | |
| 2700 | 1320 | 33.53 | 764.66 | 0.34 | |

Tabla 3.3. Reporte del ensayo 4 de tensión de la especie Guadua angustifolia.

La tabla 3.3 exhibe los valores obtenidos para la especie *Guadua angustifolia* de la probeta 4, con información de: carga (kg), desplazamiento (mm), esfuerzo (kg/cm²) y elongación (ϵ), así como las longitudes exterior e interior (cm), espesor (cm), largo de la probeta (cm), línea base (mm), peso (gr), peso volumétrico (kg/cm³), y volumen (cm³). En general cuando se realiza un ensayo de tensión o compresión²⁵, los valores se registran en una tabla similar a la tabla 3.3

Con los valores obtenidos de la tabla 3.3 se obtiene la gráfica mostrada en la figura 3.2.

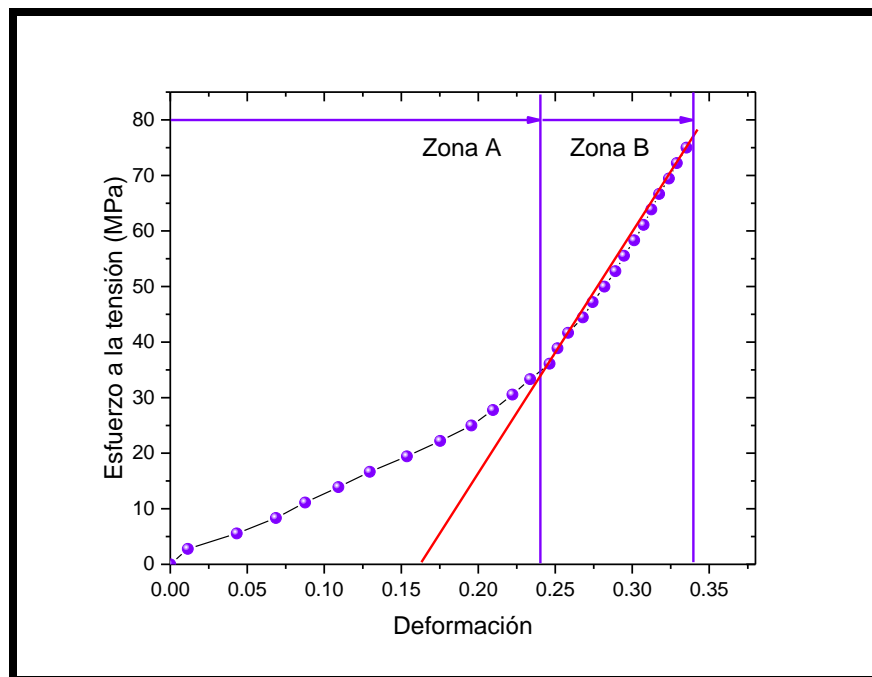


Figura 3.2. Gráfica esfuerzo vs. deformación del bambú *Guadua angustifolia* para la probeta 4.

Cuando se realizan pruebas de tensión en una máquina universal se debe hacer una corrección de gráficas, ya que existe un desplazamiento inicial relacionado entre el cabezal y el bambú, donde el extensómetro de carátula (reloj comparador) lo registra, tal como se observa en la zona A de la figura 3.2., posteriormente cuando desaparece ese huelgo entre los aditamentos y cabezales la probeta comienza a absorber carga, una vez que la probeta y los aditamentos se ajustaron, inicia la elongación real del material que es la parte elástica en la zona B de la fig. 3.2.

Se realizó un ajuste lineal de la gráfica en la figura 3.3, que es la zona B (elástica) de la figura 3.2. De la ecuación lineal ajustada en la figura 3.3 se obtiene el módulo de elasticidad o módulo de Young $\langle E \rangle = 432.3937$ MPa, que es el valor de la pendiente de la recta que mejor se ajusta por mínimos cuadrados.

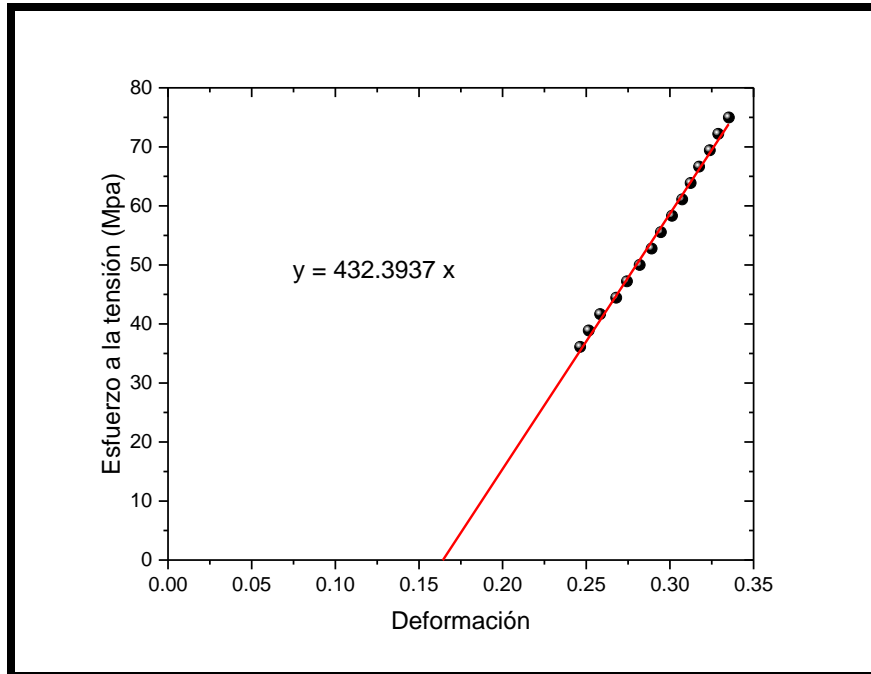


Figura 3.3. Cálculo del módulo de Young o módulo de elasticidad (pendiente de ecuación obtenida por la correlación lineal) de la prueba de tensión.

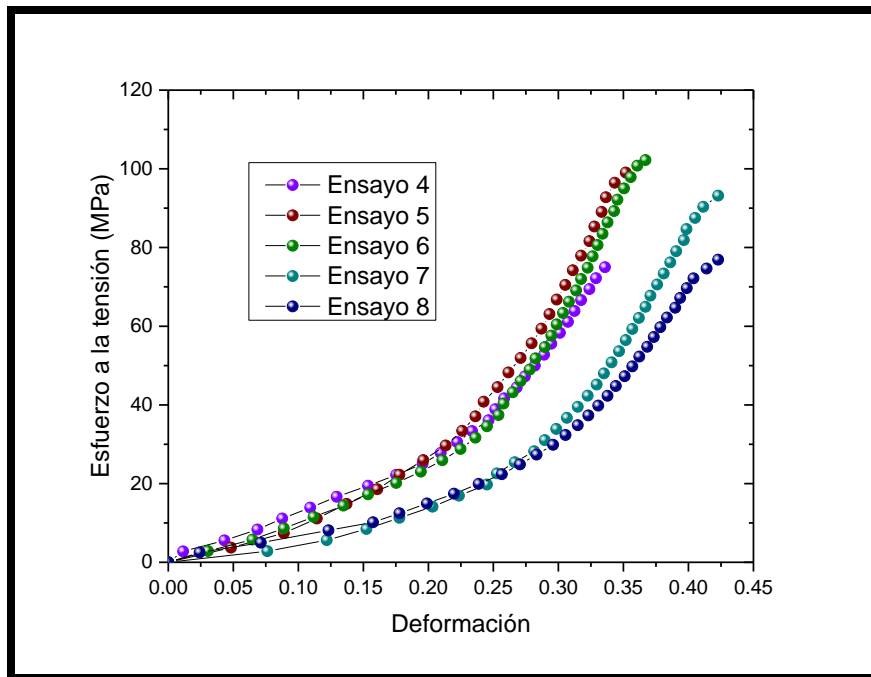


Figura 3.4. Ensayos de tensión de la especie *Guadua angustifolia*.

La figura 3.4 muestra el comportamiento de esfuerzo a la tensión vs. deformación para cada una de las probetas de la especie *Guadua angustifolia*, y en la figura 3.5 se muestra el valor del módulo de Young de cada una de las probetas analizadas, donde se obtuvo un promedio de $\langle E \rangle = 491.63 \pm 76.21$ MPa.

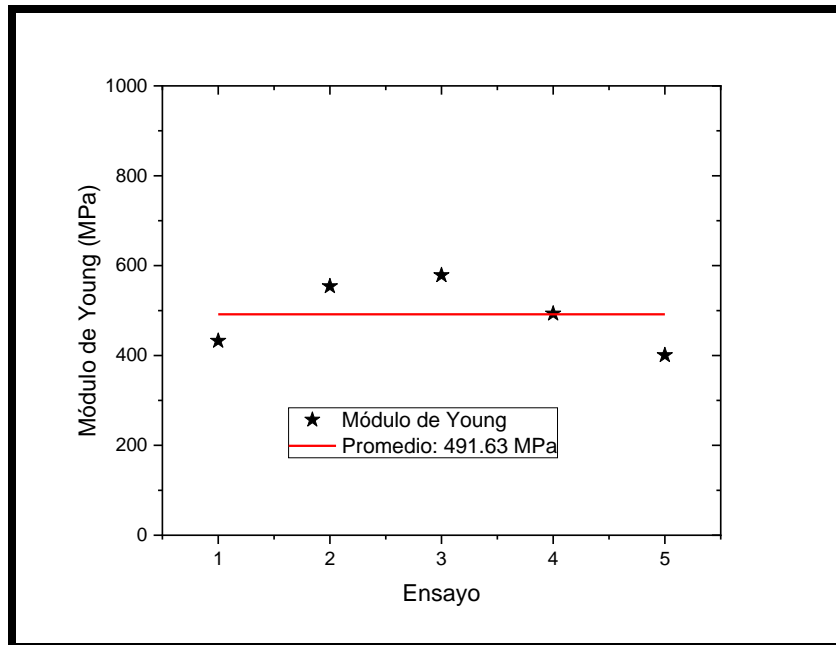


Figura 3.5. Módulo de Young de la especie *Guadua angustifolia* para los 5 ensayos de tensión.

En la siguiente sección se presentarán resultados experimentales de los esfuerzos por compresión de la especie *Guadua angustifolia*.

3.1.2. Prueba de compresión de la especie *Guadua angustifolia*.

Para realizar esta prueba se tomaron 10 muestras o probetas (Figura 3.6) de una sección de la parte media del bambú, donde se hicieron cortes de sección transversal con nudos y sin nudos. Se clasificaron de la siguiente manera: las muestras 3, 5, 7, 9, y 11 tienen nudos en la parte superior e inferior y las muestras 4, 6, 8, 10, y 12 están sin nudos. Se muestra en la tabla 3.4 la carga máxima soportada por cada una de las probetas:

| | Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Compresión (kg/cm ²) | Compresión (MPa) |
|----------|---------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------|
| Con nudo | 3 | 17,750 | 37.22 | 476.81 | 46.75 |
| | 5 | 16,750 | 33.63 | 497.94 | 48.83 |
| | 7 | 15,950 | 32.76 | 486.76 | 47.73 |
| | 9 | 15,600 | 36.68 | 425.25 | 41.70 |
| | 11 | 12,700 | 30.82 | 411.96 | 40.39 |
| Sin nudo | 4 | 6,500 | 31.96 | 203.34 | 19.94 |
| | 6 | 14,600 | 27.06 | 539.36 | 52.89 |
| | 8 | 14,750 | 28.50 | 517.46 | 50.74 |
| | 10 | 14,650 | 27.03 | 541.90 | 53.14 |
| | 12 | 13,330 | 24.13 | 551.16 | 54.04 |

Tabla 3.4. Carga total soportada por la probeta Guadua angustifolia para el ensayo de compresión.



Figura 3.6. Probetas de la especie Guadua angustifolia para realizar pruebas de compresión con nudo y sin nudo.

Las probetas se fracturaron tanto en la dirección longitudinal como en la dirección radial, ver figura 3.7. Además, se observó que las probetas con nudo soportan una carga mayor a la compresión que aquellas sin nudo, es decir, se obtiene un promedio

de máxima carga soportada de $15,750 \pm 1,895.05$ kg para las probetas con nudo y de $12,766 \pm 3,550.70$ kg para las probetas sin nudo.

En este caso el área de la sección transversal del bambú *Guadua angustifolia* fue calculado por medio del área de un cilindro hueco:

$$A = \frac{\pi(\phi_E^2 - \phi_I^2)}{4} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde ϕ_E es el diámetro exterior y ϕ_I es el diámetro interior.



Figura 3.7. Probetas de *Guadua angustifolia* después de realizarse la prueba de compresión.

En las figuras 3.8 y 3.9, se observa una mejor reproducibilidad del esfuerzo a la compresión de los bambúes con nudo respecto aquellos sin nudo. Esta diferencia de reproducibilidad es posible que se deba a dos procesos: el primero por el acomodo del cabezal móvil y la base, debido a las irregularidades de la sección transversal de los cortes del bambú y el segundo a la presencia del nudo, ya que inicialmente soporta la carga y lo trasmite a lo largo del bambú en una forma más uniforme que aquellos bambúes sin nudo.

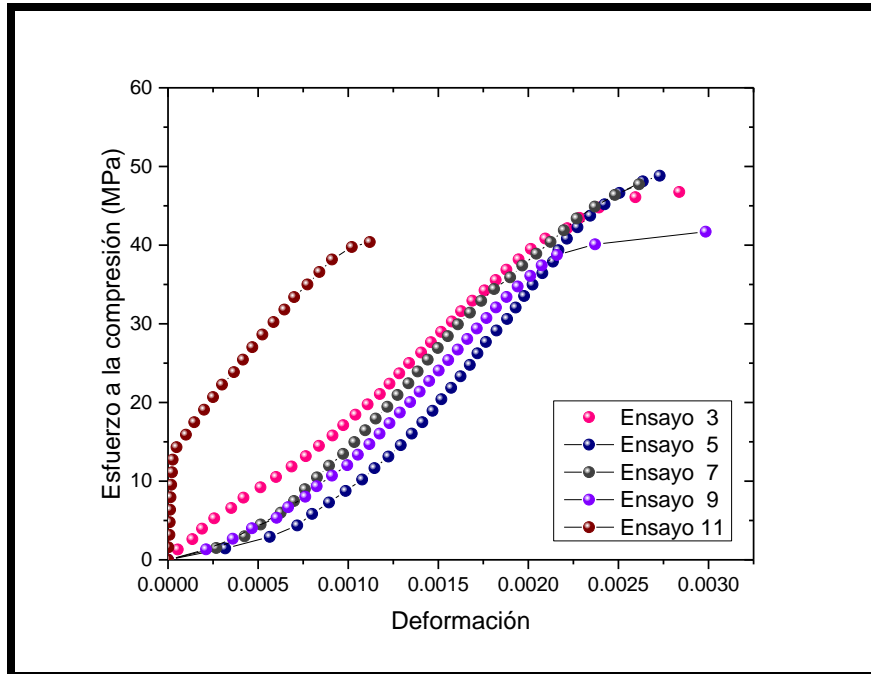


Figura 3.8. Ensayos de compresión del bambú con nudo.

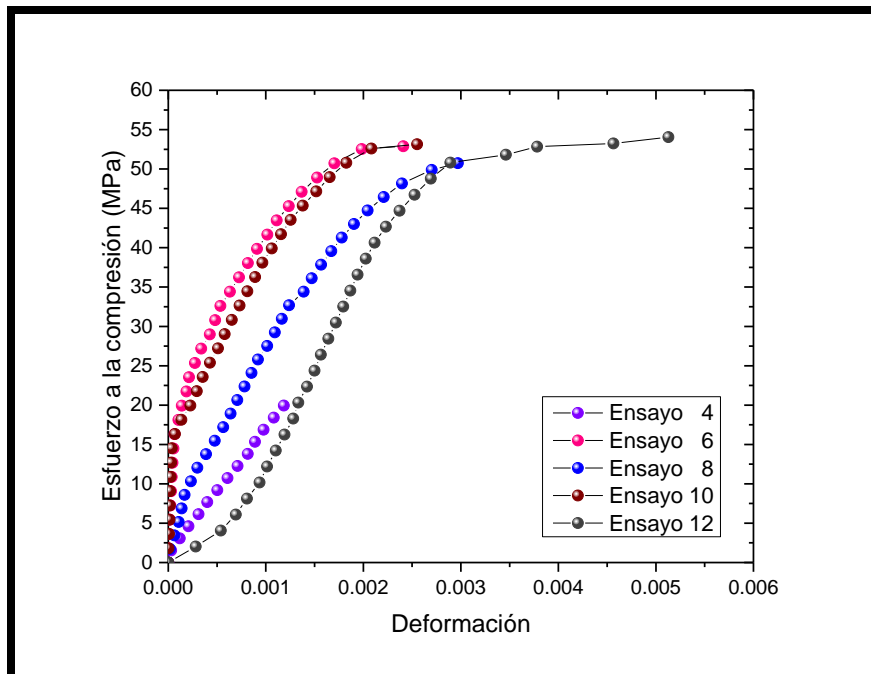


Figura 3.9. Ensayos de compresión del bambú sin nudo.

Haciendo el mismo procedimiento del ajuste lineal de la sección anterior pero ahora sobre las gráficas de compresión, se obtienen los módulos de elasticidad o módulos de Young para cada una de las probetas con nudo y sin nudo.

Las figuras 3.10 y 3.11 muestran los módulos de Young obtenidos para cada uno de los ensayos con nudo y sin nudo respectivamente. Se obtiene un valor promedio del módulo de elasticidad con nudo de $24,471.78 \pm 3043.93$ MPa y sin nudo de $20,317.62 \pm 2636.08$ MPa. Se puede observar una desviación estándar (barra de error) mayor en el caso del bambú que no contiene nudo respecto al que contiene nudo, y es debido claramente a la reproducibilidad del experimento, el cual fue explicado anteriormente.

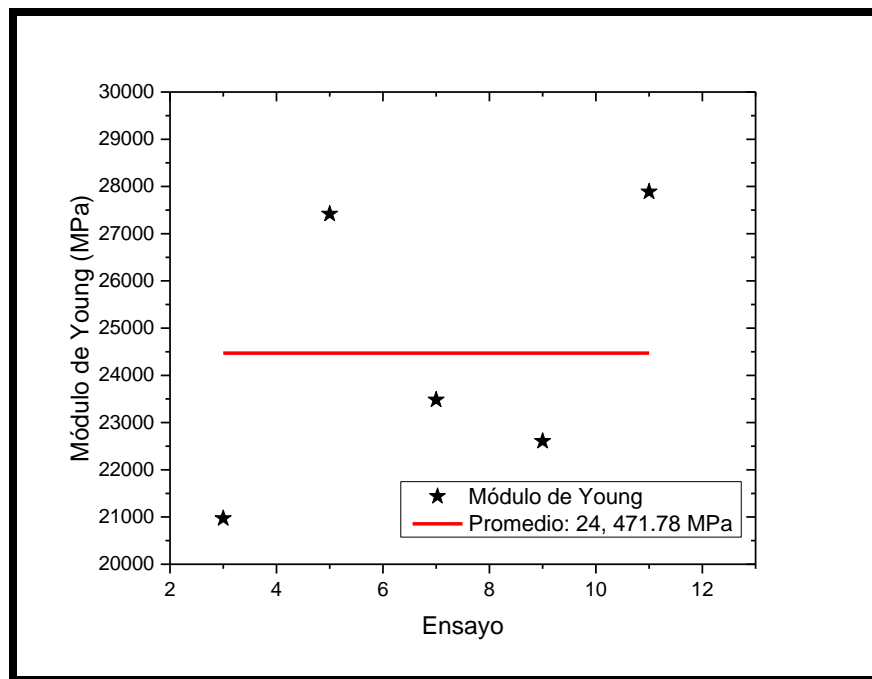


Figura 3.10. Módulo de Young del bambú para los 5 ensayos de compresión con nudo.

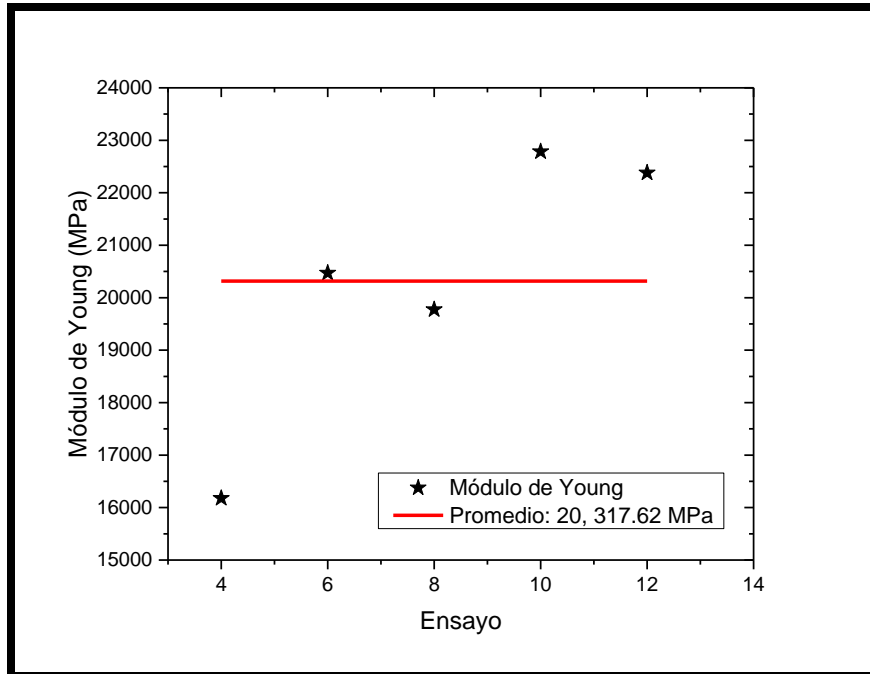


Figura 3.11. Módulo de Young del bambú para los 5 ensayos de compresión sin nudo.

Los resultados obtenidos muestran que en el nudo tiene un efecto importante sobre las propiedades mecánicas del bambú, ya que tiene un comportamiento más rígido con nudo que aquellos sin nudo. En la siguiente sección se analizarán las propiedades mecánicas de la especie *Bambusa oldhamii*, con un procedimiento similar a esta sección.

3.1.3. Prueba de tensión de la especie *Bambusa oldhamii*.

Para la especie *Bambusa oldhamii* se analizaron 13 muestras (figura 3.12) para las pruebas de tensión, utilizando mordazas planas (figura 3.13.A). En la tabla 3.5 se muestra la máxima carga soportada por cada una de las probetas.

Se obtiene un promedio de máxima carga soportada de $1,909.23 \pm 641.51$ kg que es 4 veces mayor que en el caso del bambú de la especie *Guadua angustifolia*. Lo que confirma que el *Guadua angustifolia* es más frágil para usarlo como vigas de soporte. Para el estudio de esfuerzo a la tensión vs. deformación se usaron las probetas 2-13 y la probeta 1 se usó como ensayo de referencia de la máxima carga soportada. La fractura de las probetas se manifiesta por medio de ruptura de fibras

en la dirección longitudinal (figura 3.13.B). Para el cálculo del área superficial de la probeta se utilizó la ecuación (3.1).

| Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Tensión (kg/cm ²) | Tensión MPa |
|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 1,200 | 0.67 | 1771.92 | 173.76 |
| 2 | 810 | 0.52 | 1536.02 | 150.62 |
| 3 | 1,000 | 0.72 | 1377.66 | 135.09 |
| 4 | 1,300 | 0.75 | 1732.89 | 169.93 |
| 5 | 2,020 | 1.29 | 1555.70 | 152.55 |
| 6 | 1,850 | 1.19 | 1592.37 | 156.15 |
| 7 | 1,950 | 1.21 | 1605.20 | 157.41 |
| 8 | 2,100 | 1.22 | 1713.49 | 168.03 |
| 9 | 2,520 | 1.63 | 1538.89 | 150.91 |
| 10 | 2,600 | 1.52 | 1700.29 | 166.73 |
| 11 | 2,310 | 1.22 | 1881.59 | 184.51 |
| 12 | 2,400 | 1.27 | 1888.53 | 185.19 |
| 13 | 2,760 | 1.65 | 1672.59 | 164.02 |

Tabla 3.5. Carga total soportada por la especie *Bambusa oldhamii* para el ensayo de tensión.

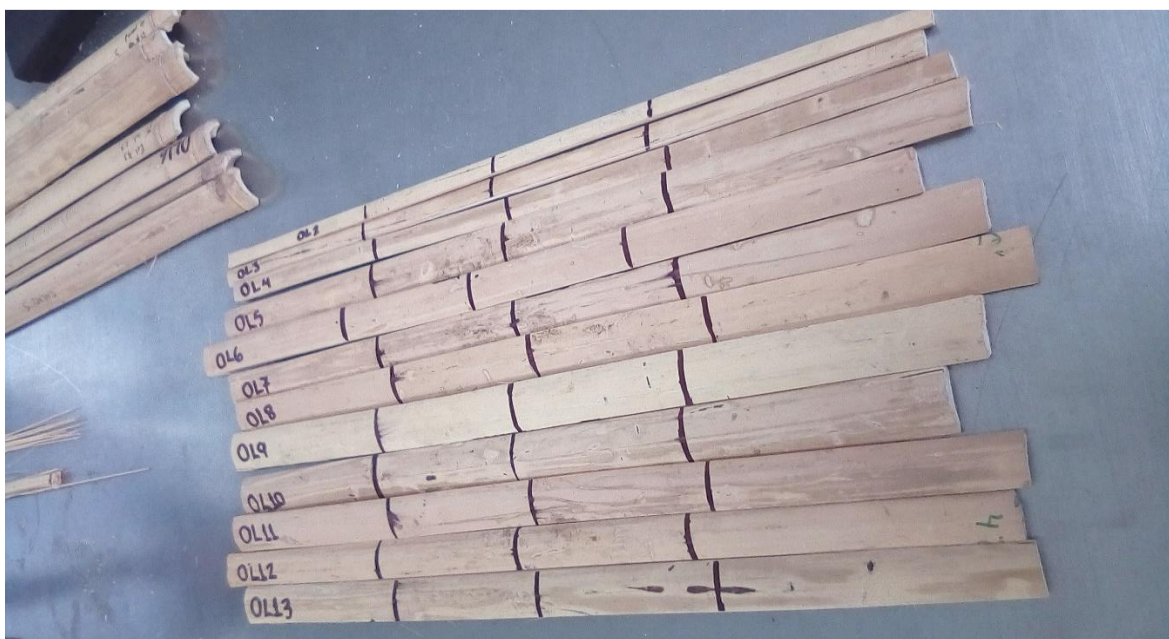


Figura 3.12. Probetas de la especie *Bambusa oldhamii* para las pruebas de tensión.



Figura 3.13. A. Posición de la probeta con mordazas planas, B. Probetas después de la prueba de tensión.

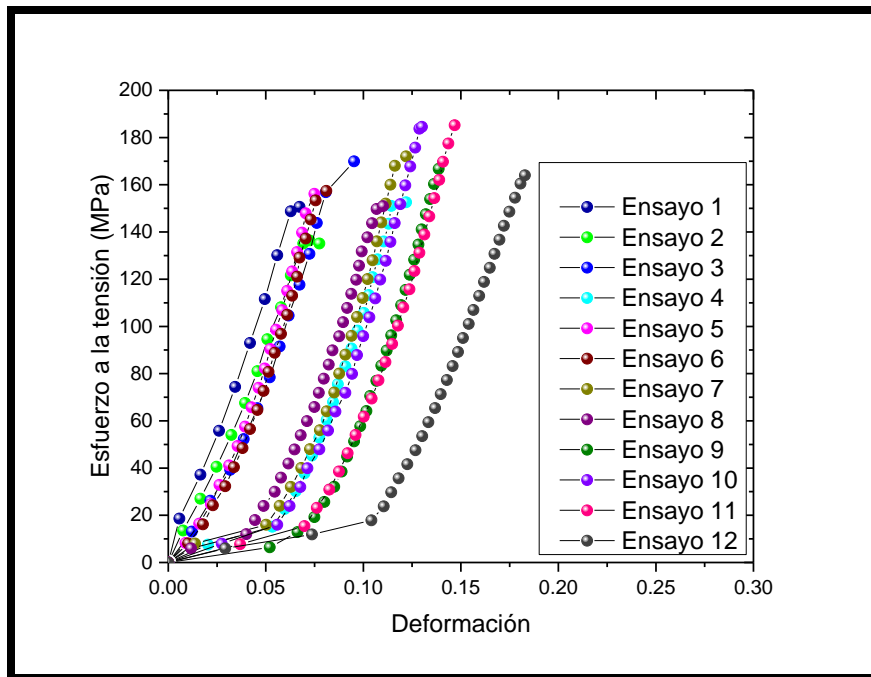


Figura 3.14. Ensayos de tensión de la especie *Bambusa oldhamii* sin nudo.

La figura 3.14 muestra el comportamiento de esfuerzo a la tensión vs. deformación para cada una de las probetas de la especie *Bambusa oldhamii*, y en la figura 3.15 se indican los valores del módulo de Young obtenidos a partir de los ajustes lineales, dando como resultado un promedio de $\langle E \rangle = 2,537.7 \pm 298.52$ MPa.

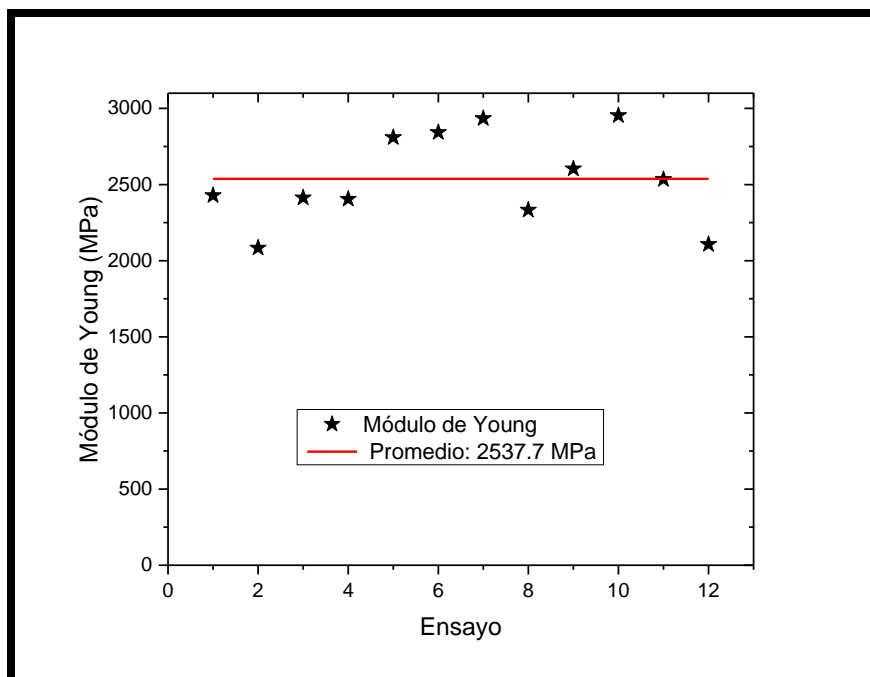


Figura 3.15. Módulo de Young de la especie *Bambusa oldhamii* para los 12 ensayos de tensión sin nudo.

En la siguiente sección se presentarán resultados experimentales de los esfuerzos por compresión de la especie *Bambusa oldhamii*.

3.1.4. Prueba de compresión de la especie *Bambusa oldhamii*.

Para este ensayo de compresión se utilizaron 13 muestras (figura 3.16). Estas probetas cumplen con la relación de esbeltez 1:2 (relación necesaria para las pruebas en varillas de acero). Su superficie tiene mayor uniformidad. Las probetas 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 son de diámetros similares están en un rango de 4.62 - 5.06 cm, también las probetas 2, 4, 5, 6, 7 tienen diámetros similares y están en un rango de 6.5 - 7.2 cm, se muestra en la tabla 3.6 la carga máxima soportada por cada una de las probetas:

| Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Compresión (kg/cm ²) | Compresión MPa |
|---------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------|
| 1 | 11,500 | 11.62 | 988.98 | 96.98 |
| 2 | 10,500 | 12.38 | 847.65 | 83.12 |
| 3 | 6,500 | 8.63 | 752.88 | 73.83 |
| 4 | 12,500 | 15.30 | 816.70 | 80.08 |
| 5 | 10,350 | 11.70 | 884.32 | 83.78 |
| 6 | 10,000 | 10.05 | 949.31 | 97.48 |
| 7 | 10,500 | 11.54 | 909.34 | 89.17 |
| 8 | 5,250 | 6.96 | 753.42 | 73.88 |
| 9 | 6,250 | 7.42 | 841.34 | 82.50 |
| 10 | 6,000 | 7.92 | 757.45 | 74.27 |
| 11 | 6,700 | 8.35 | 801.67 | 78.61 |
| 12 | 7,350 | 8.37 | 877.25 | 86.02 |
| 13 | 6,000 | 8.32 | 720.76 | 70.68 |

Tabla 3.6. Carga total soportada por la muestra *Bambusa oldhamii* para el ensayo de compresión.

Se obtiene un promedio de máxima carga soportada de $8,415.38 \pm 2,504.44$ kg, y es menor que aquellos test realizados con *Guadua angustifolia*. La mayoría de las fracturas se presentaron en la dirección longitudinal (figura 3.17 y 3.18). Para el estudio de esfuerzo a la compresión vs. deformación se usaron las probetas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13 y fallaron las probetas 7,9,11. El área se calculó con la ecuación 3.4.



Figura 3.16. Probetas para las pruebas de compresión. Especie *Bambusa oldhamii*.



Figura 3.17. Probetas 1-7 después de realizar la compresión. Especie Bambusa oldhamii.



Fig. 3.18. Probetas 5-13 después de realizar la compresión. Especie Bambusa oldhamii.

La figura 3.19 muestra el comportamiento de esfuerzo a la compresión vs. deformación para cada una de las probetas de la especie *Bambusa oldhamii*. La figura 3.20 exhibe los valores del módulo de Young obtenidos a partir de los ajustes lineales, dando como resultado un promedio de $\langle E \rangle = 90,955.41 \pm 17,434.17$ MPa.

El módulo de Young de esta especie es mayor que la de *Guadua angustifolia*. El módulo es una propiedad independiente, no depende de la fuerza y la tensión final.

Además, en materiales ordinarios, el límite elástico no tiene nada que ver con el módulo elástico. Por ejemplo, a temperatura ambiente, el módulo elástico del acero siempre es de alrededor de 200 GPa, mientras que la resistencia del acero puede variar de 250 a 2000 MPa. Sin embargo, el módulo elástico de las fibras de polímero es más complicado de obtener y puede depender fuertemente de la velocidad de deformación adoptada para estirar la muestra. En los resultados experimentales la velocidad fue constante en todos los casos: 2" por minuto.

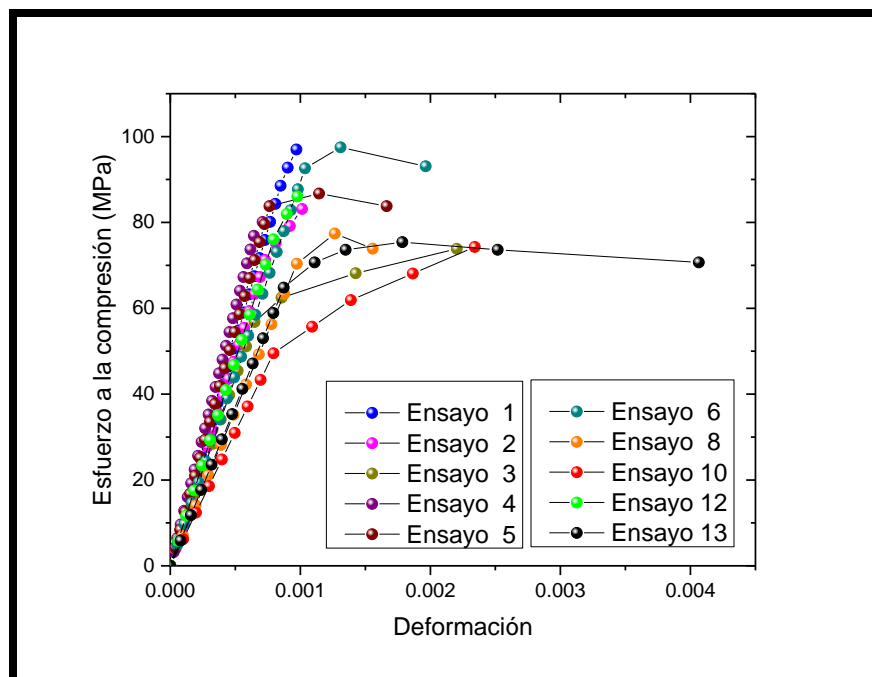


Figura 3.19. Ensayos de compresión de la especie *Bambusa oldhamii* sin nudo.

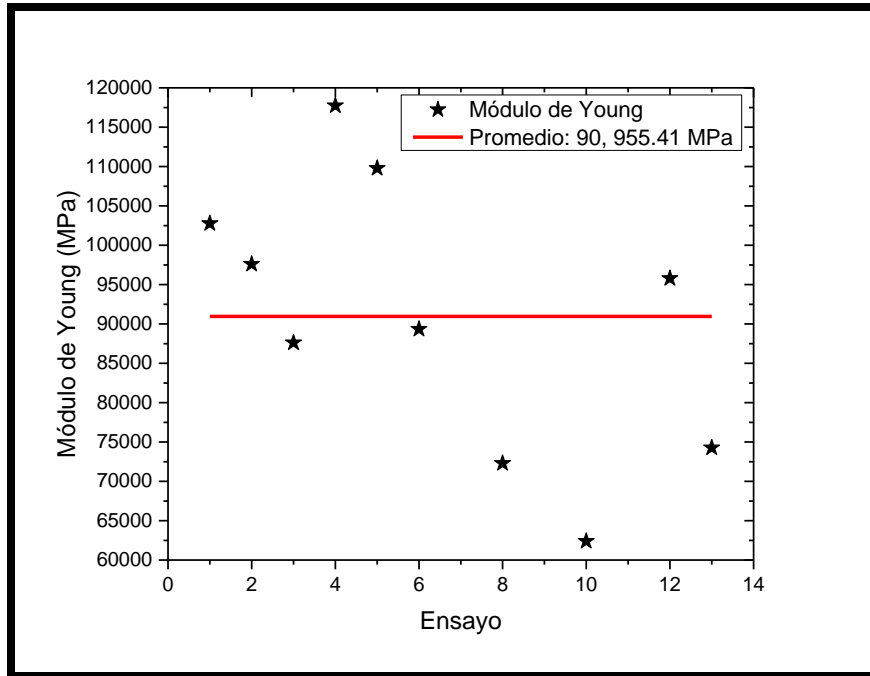


Figura 3.20. Módulo de Young de la especie *Bambusa oldhamii* para los 10 ensayos de compresión sin nudo.

En la siguiente sección se presentarán resultados experimentales de los esfuerzos por tensión de la especie *Otatea acuminata*.

3.1.5. Prueba de tensión de la especie *Otatea acuminata*.

Para la especie de *Otatea acuminata* se analizaron 11 muestras (Figura 3.21.A). Las probetas en este caso son de forma similar a una varilla, con dos nudos: superior e inferior. La probeta se colocó en dirección de su crecimiento. Se utilizaron mordazas de media caña y plana para las primeras 4 probetas, debido a que no había una buena adherencia, para el resto se utilizaron mordazas triangular y media caña, estas tenían mayor amarre y no permitían el deslizamiento. En la tabla 3.7 se muestra la carga máxima soportada. La probeta 1, se tomó como referencia para conocer el límite de carga soportada por la especie *Otatea acuminata*. Para el estudio de tensión consideramos las probetas 2-9. El área se calculó con la ecuación:

$$A = \frac{\pi\emptyset^2}{4} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

donde \emptyset es el diámetro del área de la sección transversal del bambú.

| Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Tensión (kg/cm ²) | Tensión MPa |
|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 2650 | 1.51 | 1748.84 | 171.49 |
| 2 | 2200 | 1.72 | 1274.79 | 125.01 |
| 3 | 1700 | 1.85 | 914.65 | 89.69 |
| 4 | 1475 | 1.38 | 1082.39 | 106.14 |
| 5 | 2640 | 2.20 | 1198.07 | 117.48 |
| 6 | 1190 | 1.31 | 907.21 | 88.96 |
| 7 | 1290 | 1.18 | 1087.41 | 106.63 |
| 8 | 750 | 0.95 | 783 | 76.87 |
| 9 | 1320 | 1.71 | 770.41 | 75.54 |
| 10 | No se realizó la prueba | - | - | - |
| 11 | 2550 | 2.3 | 1108.61 | 108.71 |

Tabla 3.7. Carga total soportada por la muestra de la especie *Otatea acuminata* para el ensayo de tensión.



Figura 3.21. Probetas de la especie *Otatea acuminata*. A) antes de la prueba de tensión, B) después de la prueba de tensión.

Se observó que en todas las probetas se fracturó en el nudo (figura 3.21.B) cercano al deslizamiento del cabezal. Se esperaba que en el nudo no hubiera fractura (como en el caso de *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii*) ya que aparentemente es más rígido y puede deberse a la forma y orientación de las fibras, tal como lo veremos en la sección de tomografía. Se obtuvo un promedio de máxima carga soportada antes de fracturarse de $1,776.5 \pm 685.22$ kg.

La figura 3.22 muestra el comportamiento de esfuerzo a la tensión vs. deformación para cada una de las probetas de la especie *Otatea acuminata*, y en la figura 3.23 se exhiben los valores del módulo de Young obtenidos a partir de los ajustes lineales, dando como resultado un promedio de $\langle E \rangle = 645.85 \pm 180.46$ MPa.

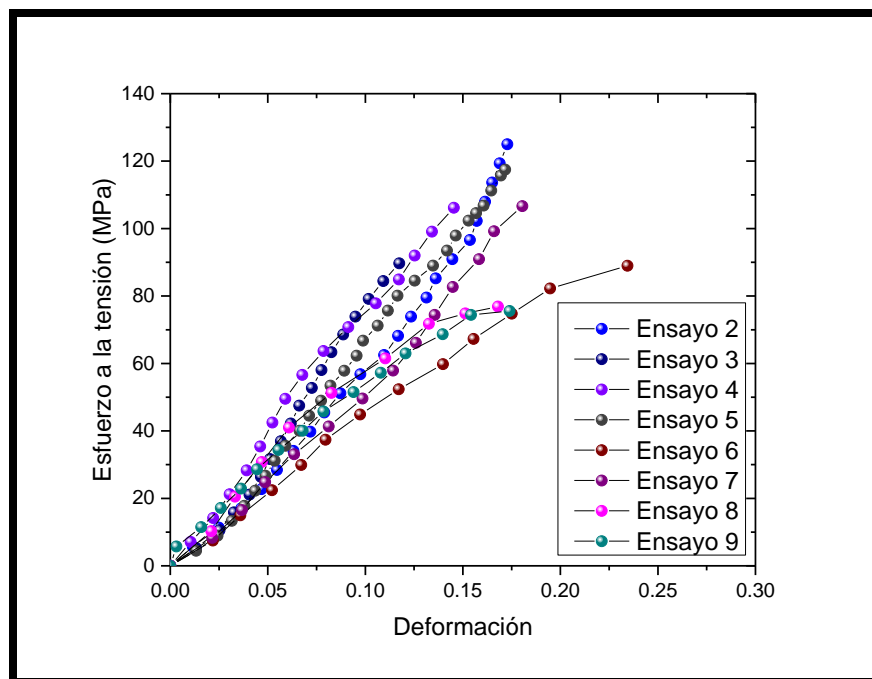


Figura 3.22. Ensayos de tensión del bambú *Otatea acuminata* con nudo.

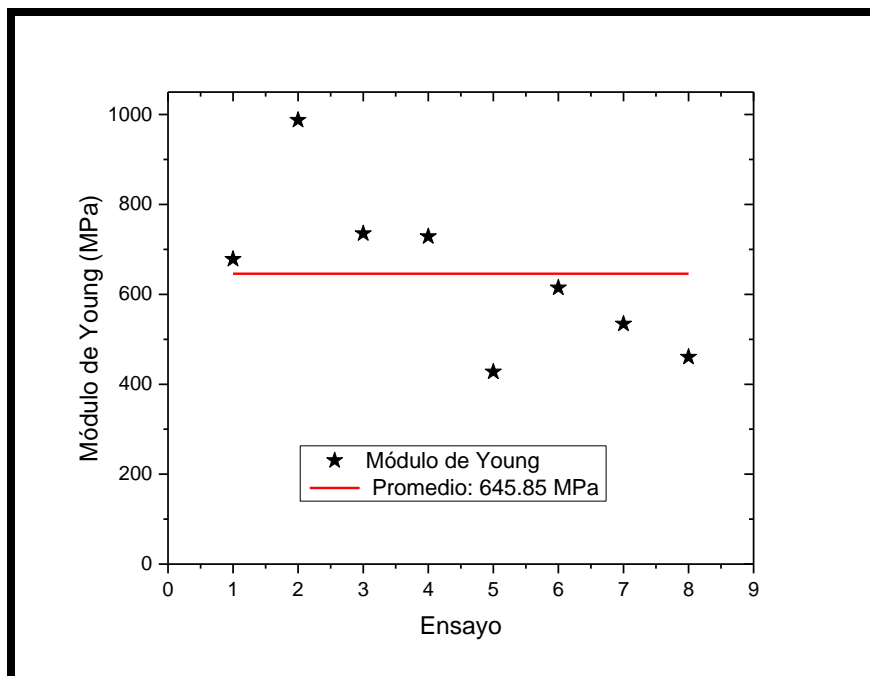


Figura 3.23. Módulo de Young del bambú *Otatea acuminata* para los 8 ensayos de tensión sin nudo.

En la siguiente sección se presentarán resultados experimentales de los esfuerzos por compresión de la especie *Otatea acuminata*.

3.1.6. Prueba de compresión de la especie *Otatea acuminata*.

Se usaron 11 probetas para las pruebas de compresión de la especie *Otatea acuminata*. Las probetas 1,2,3,4,5, y 6 tienen nudos en la parte inferior. Las probetas 7, 8, 9, 10, y 11 están sin nudos. La tabla 3.8 muestra la carga máxima soportada:

| | Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Compresión (kg/cm ²) | Compresión MPa |
|----------|---------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------|
| Con nudo | 1 | 2,350 | 3.43 | 684.99 | 67.17 |
| | 2 | 1,400 | 2.45 | 570.90 | 55.98 |
| | 3 | 1,690 | 2.14 | 786.54 | 77.13 |
| | 4 | 1,650 | 2.09 | 785.88 | 77.06 |
| | 5 | 1,940 | 2.14 | 905.08 | 88.75 |
| | 6 | 1,260 | 1.81 | 693.46 | 68.00 |

| | | | | | |
|----------|----|-------|------|--------|-------|
| Sin nudo | 7 | 1,490 | 1.88 | 791.68 | 77.63 |
| | 8 | 1,360 | 1.74 | 777.87 | 76.28 |
| | 9 | 1,380 | 1.71 | 806.52 | 76.09 |
| | 10 | 1,910 | 2.15 | 887.86 | 87.06 |
| | 11 | 1,650 | 1.95 | 845.82 | 82.94 |

Tabla 3.8. Carga total soportada por la muestra Otatea para el ensayo de compresión.

Para este análisis se tomaron las probetas: 2, 3, 5, 6 con nudo y 7, 8, 9, 11 sin nudo. La probeta 1 se consideró como ensayo de referencia y las probetas 4, 10, no se consideraron por falla en el extensómetro. Se obtuvo un promedio de máxima carga soportada de $1,715 \pm 391.13$ kg para las probetas con nudo y de $1,558 \pm 227.96$ kg para las probetas sin nudo.

Las muestras se fracturaron en la dirección longitudinal y radial, ver figura 3.24. Además, se observó que las probetas con nudo soportan una carga mayor a la compresión que aquellas sin nudo, como en el caso de la especie *Bambusa oldhamii*.



Figura 3.24. Probetas de la especie *Otatea acuminata*, después de la prueba de compresión.

La figura 3.25 representa el comportamiento de cada uno de los ensayos de compresión de la especie *Otatea acuminata* con nudo y la figura 3.26 sin nudo. De los análisis respectivos en los ajustes de estas gráficas experimentales se obtienen los valores del módulo de Young, ver figuras 3.27 y 3.28. Se obtuvo un valor del módulo de elasticidad promedio con nudo de $14,934.76 \pm 3,090.64$ MPa y sin nudo alrededor de $13,322.60 \pm 1438.35$ de MPa.

Esta especie no presenta gran variación en la desviación estándar (barra de error) respecto a los otros análisis realizados en las secciones anteriores.

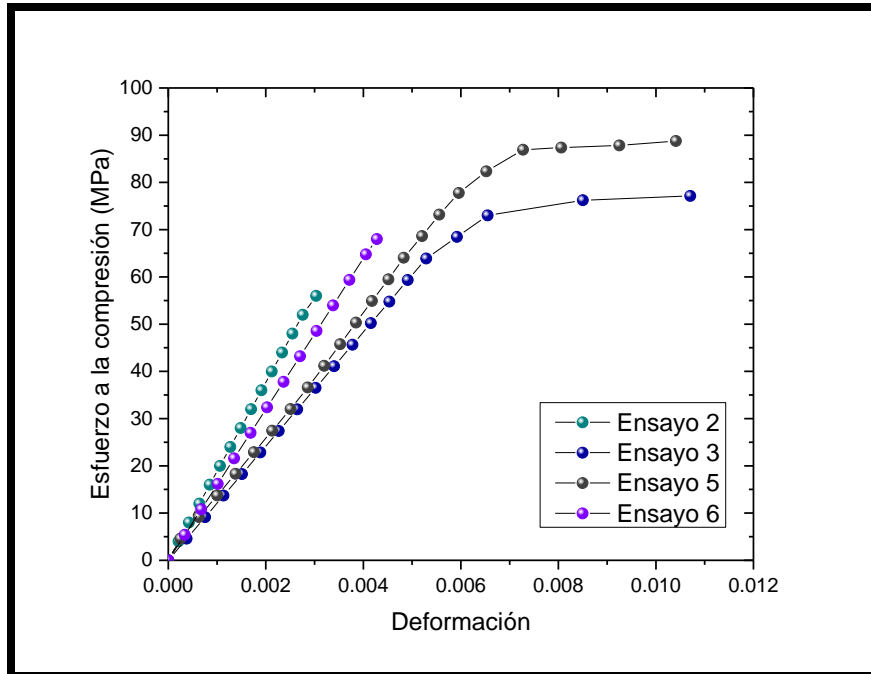


Figura 3.25. Ensayos de compresión de la especie *Otatea acuminata* con nudo.

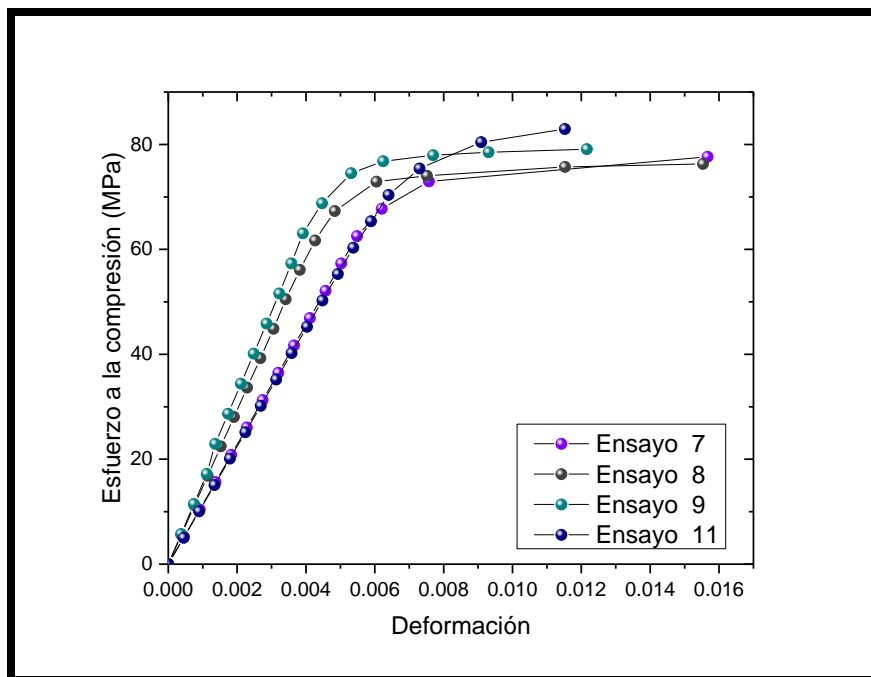


Figura 3.26. Ensayos de compresión de la especie *Otatea acuminata* sin nudo.

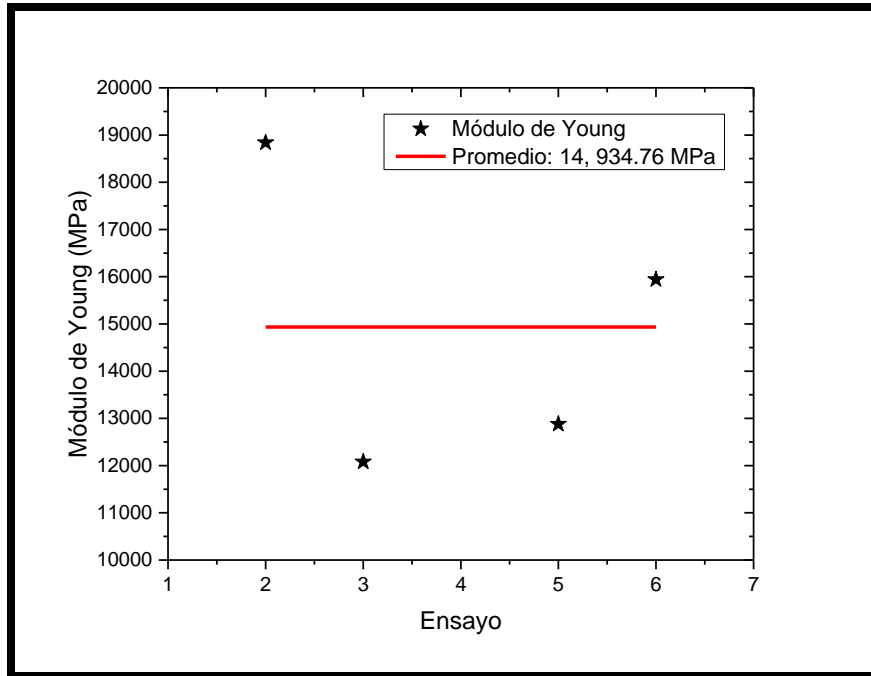


Figura 3.27. Módulo de Young de la especie *Otatea acuminata* para los 4 ensayos de compresión con nudo.

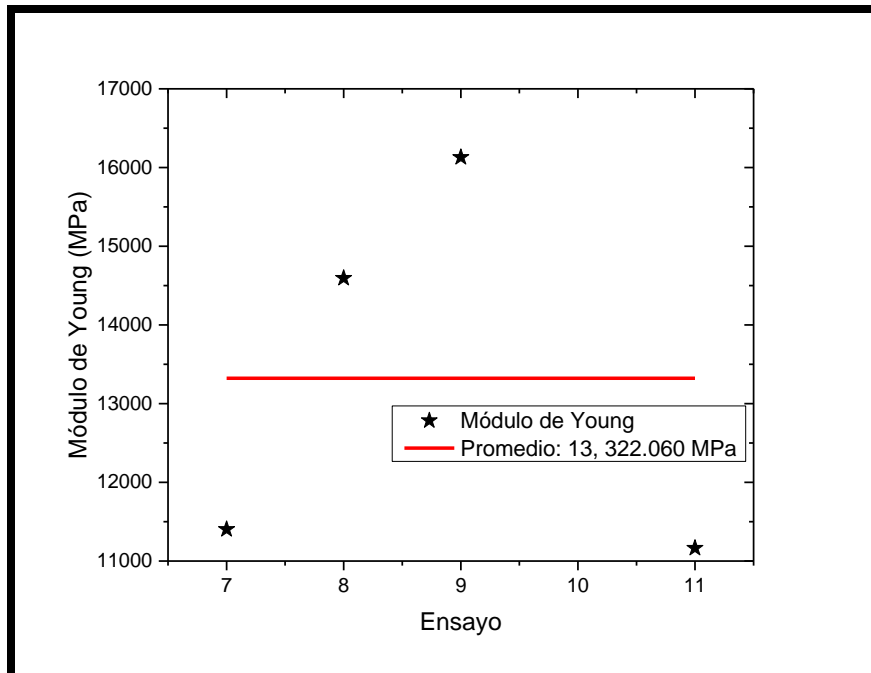


Figura 3.28. Módulo de Young de la especie *Otatea acuminata* para los 4 ensayos de compresión sin nudo.

En la siguiente sección se presentarán resultados experimentales de los esfuerzos por tensión del Ocotate.

3.1.7. Prueba de tensión del bambú Ocotate.

Para estas pruebas se utilizaron 11 probetas perfiladas de los cantos en forma rectangular para mayor adherencia con las barras planas, estas tienen nudo en el centro (Figura 3.29.A): Las pruebas de tensión del bambú Ocotate, tuvieron una máxima carga de:

| Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Tensión (kg/cm ²) | Tensión MPa |
|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 610 | 0.88 | 688.16 | 67.48 |
| 2 | 350 | 0.43 | 808.23 | 79.25 |
| 3 | 790 | 1.05 | 748.15 | 73.36 |
| 4 | 800 | 0.92 | 862.67 | 84.59 |
| 5 | 730 | 0.90 | 804.68 | 78.91 |
| 6 | 570 | 1.91 | 297.03 | 29.12 |
| 7 | 550 | 0.84 | 652.12 | 63.94 |
| 8 | 520 | 0.66 | 783.82 | 76.86 |
| 9 | 600 | 0.70 | 846.42 | 83.00 |
| 10 | 410 | 0.81 | 500.22 | 49.05 |
| 11 | 480 | 0.88 | 462.53 | 45.35 |

Tabla 3.9. Carga total soportada por el bambú Ocotate para el ensayo de tensión.

De la tabla 3.9 se obtiene un promedio de máxima carga soportada de 582.72 ± 145.81 kg, presentándose una fractura similar a los bambúes *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* y *Otatea acuminata* (figura 3.29.B). La probeta 1 es de prueba, se analizaron las probetas 2-11. En este caso el área de la sección transversal de estas probetas se midió por medio de la ecuación de un rectángulo:

$$A = b * h \quad \text{Ec. (3.6)}$$

donde h es la altura y b su base.

La figura 3.31 muestra el comportamiento de esfuerzo a la tensión vs. deformación para cada una de las probetas del Ocotate, donde se presenta un comportamiento lineal hasta el límite elástico alcanzado. De estas gráficas se obtuvieron los valores del módulo de Young para cada una de las probetas (figura 3.23), donde en promedio se obtiene $\langle E \rangle = 550.19 \pm 203.40$ MPa.

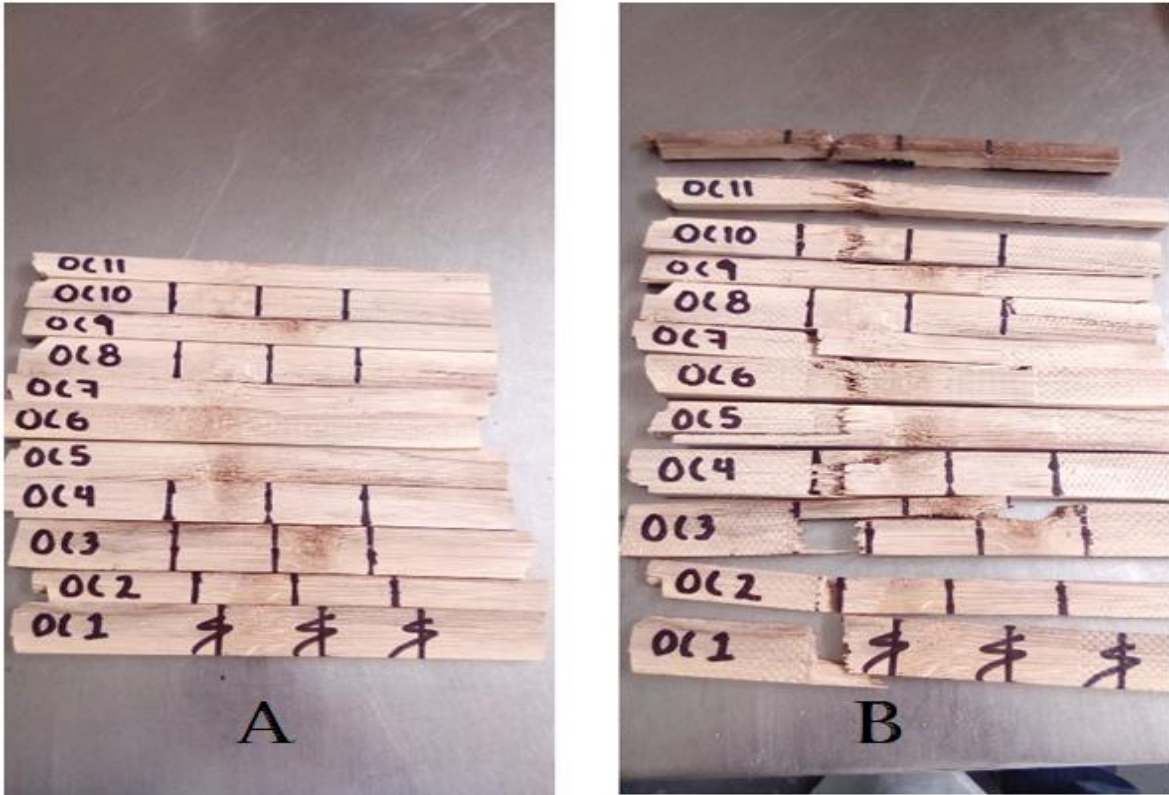


Figura 3.29. Probetas de Ocotate para pruebas de tensión. A) Antes de la prueba, B) después de la prueba.

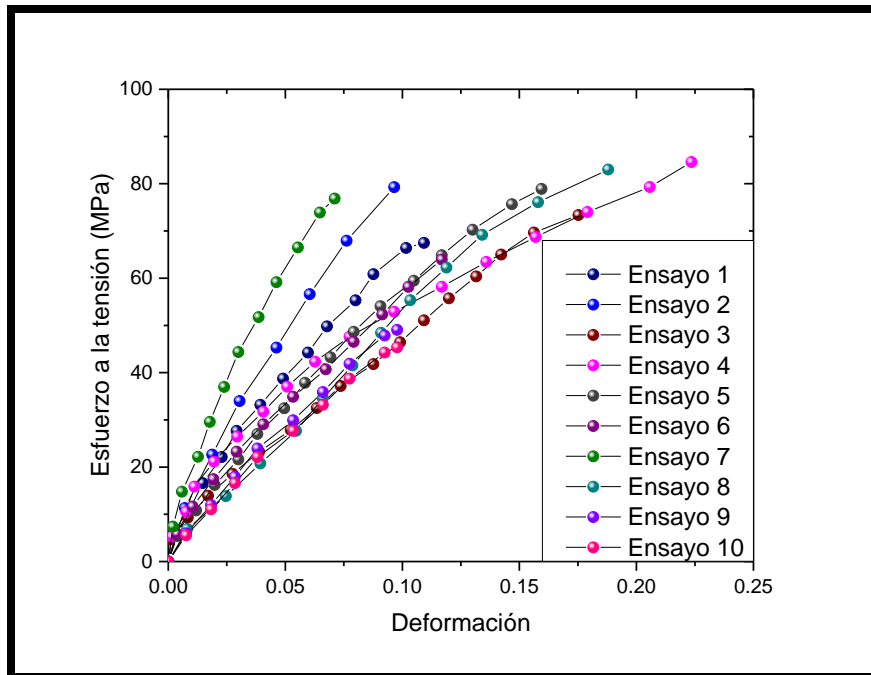


Figura 3.30. Ensayos de tensión del bambú Ocotate con nudo.

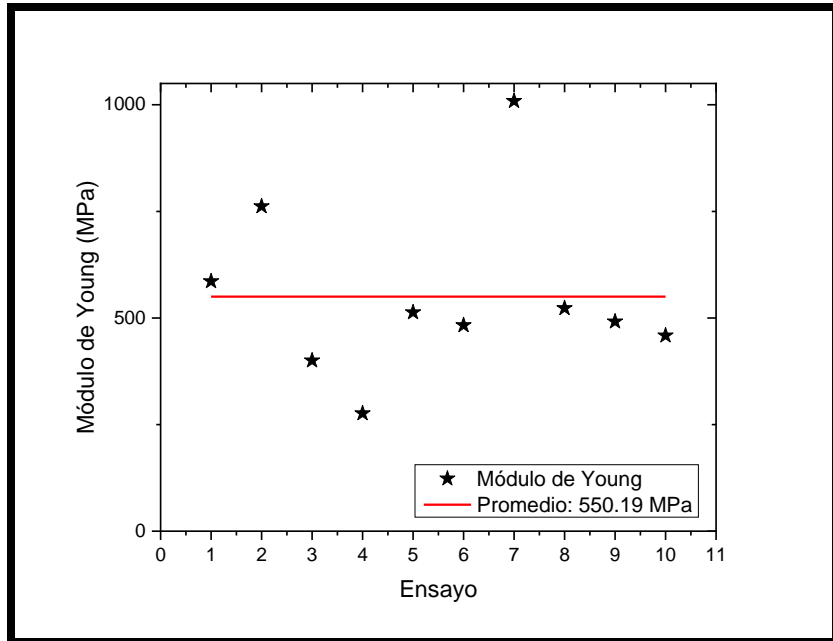


Figura 3.31. Módulo de Young del bambú Ocotate para los 10 ensayos de tensión con nudo.

Los resultados muestran que el módulo de Young para el Ocotate es mayor que la *Otatea acuminata* y mucho menor que los de *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii*. En la siguiente sección se muestran los resultados experimentales de las pruebas de compresión para este bambú.

3.1.8. Prueba de compresión del bambú Ocotate.

Se usaron 8 probetas para los ensayos de tensión de la sección media del culmo del bambú Ocotate (figura 3.32). Las probetas 1, 3, 5, y 7 tienen nudos en la partes superior e inferior. Las probetas 2, 4, 6, y 8 están sin nudos. La tabla 3.10 muestra la máxima carga soportada en las pruebas de compresión. Se obtiene un promedio de máxima carga soportada de $15,000 \pm 1,102.27$ kg para las probetas con nudo y de $18,512.5 \pm 2316.74$ kg para las probetas sin nudo. Su área se calculó con la ecuación 3.5. Se colocaron de acuerdo a la orientación de las fibras de su crecimiento. Todas las probetas se fracturaron en la dirección longitudinal (figura 3.33 y 3.34) como las otras especies de bambú.

| | Probeta | Máxima carga soportada (kg) | Área (cm ²) | Compresión (kg/cm ²) | Compresión MPa |
|----------|---------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------|
| Con nudo | 1 | 16,250 | 97.83 | 166.10 | 16.28 |
| | 3 | 15,600 | 88.60 | 176.05 | 17.26 |
| | 5 | 14,150 | 80.19 | 176.44 | 17.30 |
| | 7 | 14,000 | 77.95 | 179.57 | 17.61 |
| Sin nudo | 2 | 17,500 | 88.53 | 197.65 | 19.38 |
| | 4 | 15,750 | 77.95 | 199.54 | 19.56 |
| | 6 | 20,000 | 72.03 | 277.65 | 27.22 |
| | 8 | 20,800 | 72.10 | 288.45 | 28.28 |

Tabla 3.10. Carga total soportada por la muestra Ocotate para el ensayo de compresión.

La figura 3.35 representa el comportamiento de cada uno de los ensayos de compresión del Ocotate con nudo, donde tienen un comportamiento lineal, sin embargo, en este caso los valores experimentales en cada uno de ellos presentan una diferencia mayor que los casos anteriores, es decir, una menor reproducibilidad en el comportamiento elástico. De los ensayos de compresión con nudo y sin nudo (figuras 3.35 y 3.36) se obtienen los módulos de Young con nudo y sin nudo respectivamente (figuras 3.37 y 3.38). Se obtiene un valor promedio con nudo de $6,566.62 \pm 3537.44$ MPa y sin nudo $8765.72 \pm 2,841.43$ de MPa, siendo los módulos de Young más bajos de todos los bambúes estudiados.



Figura 3.32. Probetas de Ocotate para las pruebas de compresión.



Figura 3.33. Probetas de Ocotate con nudo después de la compresión.



Figura 3.34. Probetas de Ocotate sin nudo después de la compresión.

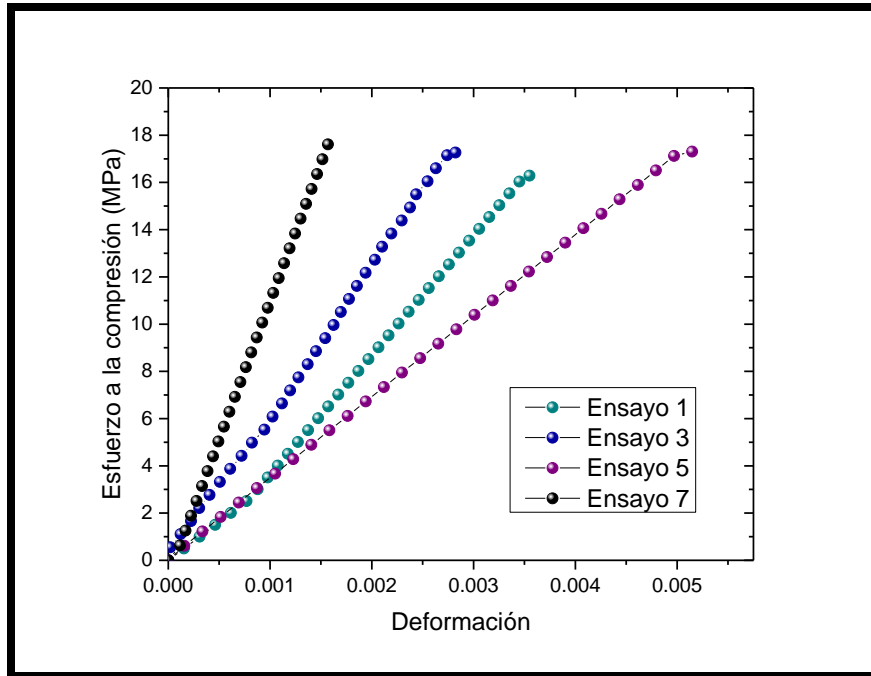


Figura 3.35. Ensayos de compresión del bambú Ocotate con nudo.

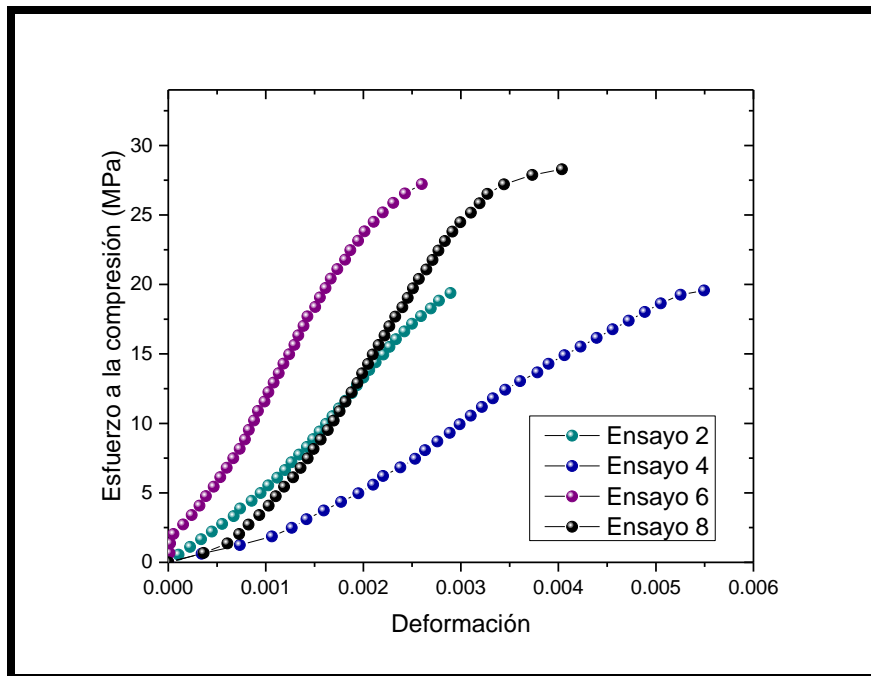


Figura 3.36. Ensayos de compresión del bambú Ocotate sin nudo.

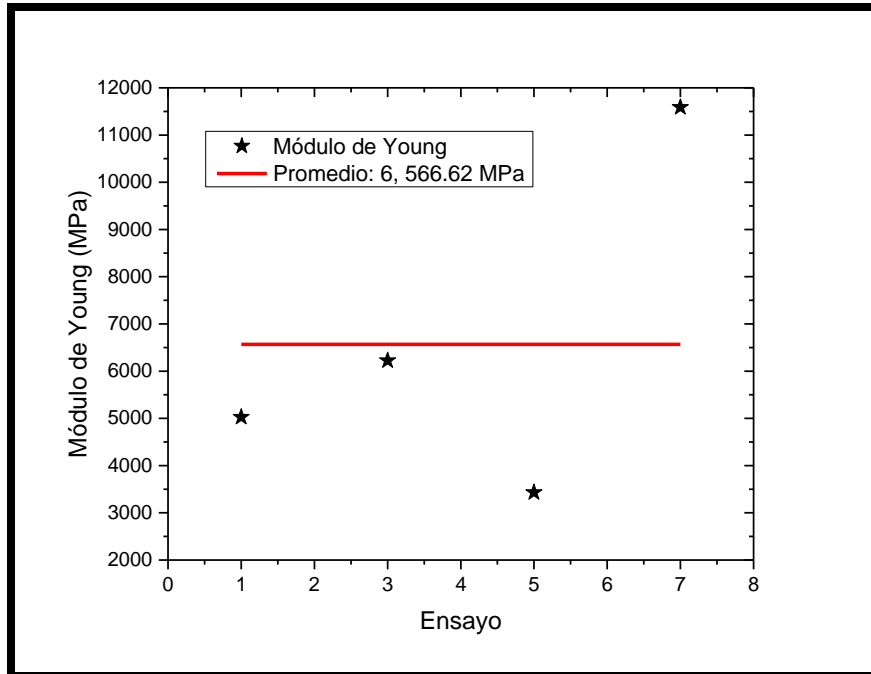


Figura 3.37. Módulo de Young del bambú Ocotate para los 4 ensayos de compresión con nudo.

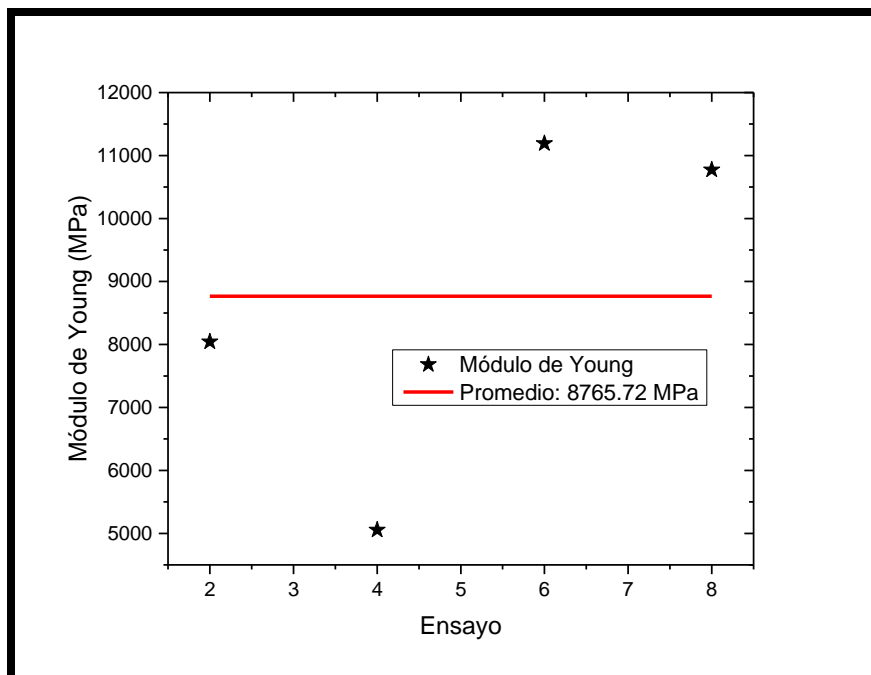


Figura 3.38. Módulo de Young del bambú Ocotate para los 4 ensayos de compresión sin nudo.

3.1.9. Tabla de resultados de las 4 especies: *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii*, *Otatea acuminata* y *Ocotate* (nombre común).

En esta sección se reportan las diferencias encontradas sobre las propiedades mecánicas de cada una de las especies, resumiendo de la siguiente manera: con mayor resistencia a la tensión fue la especie *Bambusa oldhamii*, seguida de *Otatea acuminata*, *Ocotate* y por último la especie *Guadua angustifolia*. La especie con mayor resistencia a la compresión es la de *Bambusa oldhamii*, seguida por *Guadua angustifolia*, *Otatea acuminata* y *Ocotate*. En la tabla 3.11 se muestran los valores encontrados sobre la resistencia y las propiedades mecánicas de las especies de bambú empleadas en este trabajo.

| Especie | Módulo de Young (MPa) | | |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|
| | Esfuerzo a la tensión | Esfuerzo a la compresión | |
| | | con nudo | sin nudo |
| <i>Guadua angustifolia</i> | 491.63 ± 76.21 | 24,471 ± 3044 | 20,317 ± 2636 |
| <i>Bambusa oldhamii</i> | 2537.20 ± 298.52 | | 90,955 ± 7434 |
| <i>Otatea acuminata</i> | 645.85 ± 180.46 | 14,934 ± 3091 | 13,322 ± 2438 |
| <i>Ocotate</i> | 550.19 ± 203.40 | 6,566 ± 3537 | 8,765 ± 2841 |

Tabla 3.11. Comparación entre las 4 especies.

Las propiedades mecánicas encontradas en este trabajo pueden compararse con materiales convencionales de construcción, vease la tabla 3.12. donde se da información de los módulos de elasticidad²³.

| Material | E (Gpa) | Material | E (Gpa) |
|----------|---------|-------------|---------|
| Acero | 210 | Hormigón | 20 |
| Cobre | 120 | Zinc | 100 |
| Latón | 100 | Duraluminio | 70 |
| Bronce | 110 | Aluminio | 76 |
| Granito | 50 | Fundición | 170 |
| Madera | 10 | Estaño | 40 |

Tabla 3.12. Módulos de elasticidad de materiales más usados en construcción.

El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material; cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad es indispensable para diseñar cualquier elemento mecánico sometido a esfuerzos²⁶. El valor del módulo de Young promedio obtenido para las pruebas de compresión de la especie *Bambusa oldhamii* es ocho veces mayor respecto al valor de la madera.

Dado que no existe un material que sea infinitamente rígido, la acción de las fuerzas se traduce en que el cuerpo se deforma. El cuerpo se comporta de forma suficiente rígida como para que los movimientos que se producen en el proceso de deformación sean pequeños comparados con las dimensiones del cuerpo (principio de rigidez)²³. Por ejemplo, la tensión depende del punto y de la orientación de la sección elegidos.

Todo cuerpo se deforma bajo la acción de fuerzas aplicadas, y al cesar estas, el cuerpo tiende a recuperar su forma primitiva. Esta tendencia que en mayor o menor grado, tienen los cuerpos se denomina elasticidad²³. Si las deformaciones permanentes son muy pequeñas pueden considerarse materiales elásticos. Los bambúes no presentan deformaciones visibles, por lo que podemos considerarlos elásticos. Las 4 especies presentan propiedades elásticas que pueden diferir respecto a materiales como el acero debido a la forma en como se distribuyen las fibras.

Los materiales dúctiles como el acero o el cobre presentan un marcado comportamiento plástico. La fundición, el hormigón o el vidrio son llamados frágiles, no se presenta una zona plástica bien definida²³. Las pruebas de tensión de las 4 especies de bambú, presentan un comportamiento frágil, mientras que las pruebas de compresión aparentemente presentan una zona plástica. No es del todo riguroso calificar a un material como dúctil o frágil ya que el comportamiento depende en gran medida de las condiciones de carga. En el caso del hormigón, su resistencia a la compresión es mucho mayor que la tensión cuyos ordenes de magnitud son alrededor de 10 veces²³, esto muestra un comportamiento dúctil (o plástico). Las cuatro especies muestran este comportamiento.

La resistencia (estado de tensión) de materiales limita su campo de aplicación a ciertos tipos de elementos estructurales (vigas, columnas, etc.) sustentados de ciertas maneras predeterminadas (apoyos simples, articulaciones, empotramientos, etc.) y sometidas a ciertos tipos de acciones (fuerzas puntuales y repartidas, generalmente, y otras acciones definidas de forma adecuada)²³.

Existen normas internacionales que especifican métodos de prueba para evaluar las propiedades físicas y de resistencia características del bambú que puedan ser utilizadas en construcción, por ejemplo, la norma ISO 22157-1: 2004; relaciona el contenido de humedad, masa por volumen, contracción, compresión, flexión, cizallamiento y tensión. Otra norma como ISO 22156: 2004 se aplica al uso de estructuras de bambú, es decir, estructuras hechas de bambú (bambú redondo, bambú partido, bambú laminado encolado) o paneles a base de bambú unidos con adhesivos o sujetadores mecánicos.

Los culmos o tallos son relativamente fáciles de cortar, ligeros, de fácil manejo y resistentes. Esto hace del bambú un elemento útil, práctico y confiable para ser usado

en aplicaciones donde la resistencia es un factor de alta consideración. La propiedad mecánica de cada bambú depende de muchos factores, entre ellos; la especie, la humedad, la edad del bambú, la sección del bambú (basal, media, apical), entre otros factores²⁷.

3.2. Tomografía.

En esta sección se realizaron experimentos de tomografía de rayos X con el objetivo de inferir la densidad del bambú, así como el análisis de la estructura interna. En la figura 3.39 se muestran imágenes tomográficas de la sección media (boca de pescado, BPG1) del bambú *Guadua angustifolia* kunst, recolectada de Chiapas México.

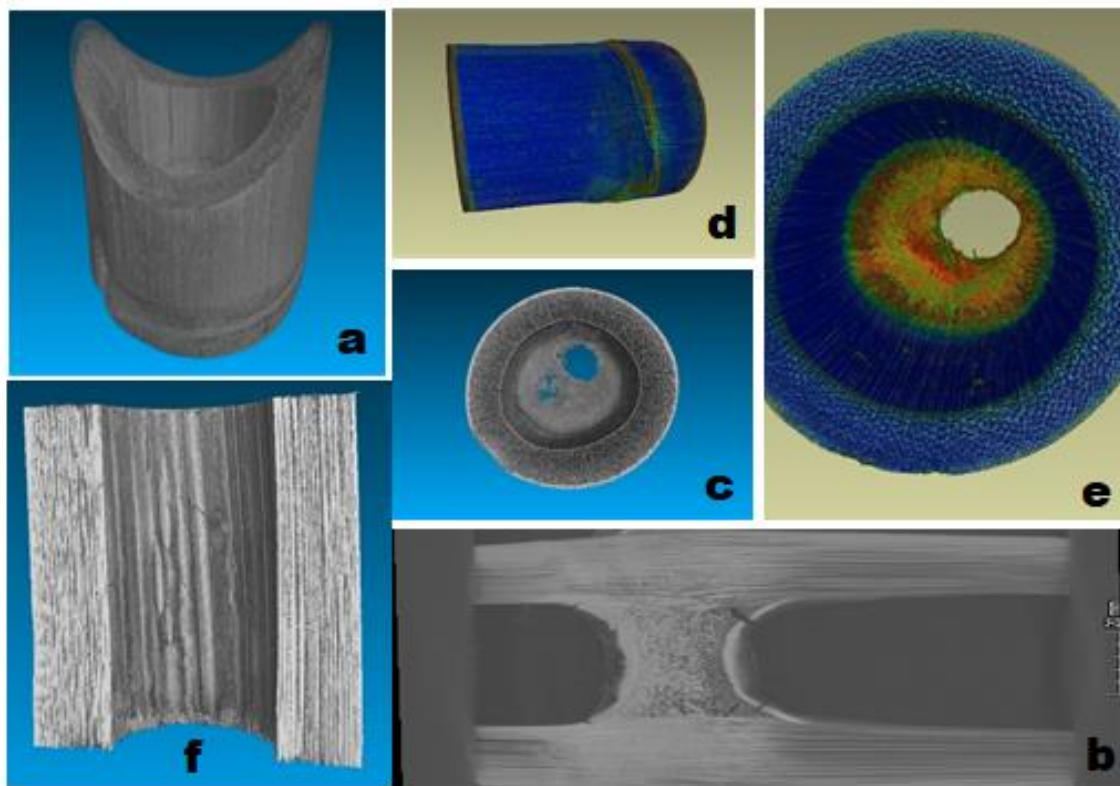


Figura 3.39. Tomografía de rayos X. a) Reconstrucción del bambú, imagen en 3D. b) Corte longitudinal (distribución de las fibras). c) Plano Z en 3D. d) Posición horizontal de la imagen en 3D, e) distribución de la porosidad en la estructura interna del bambú (cada color representa un tamaño de poro). f) Corte en la dirección longitudinal en 3D.

En la siguiente sección se mostrará la metodología empleada para la obtención de la densidad de los diferentes bambúes y se relacionará con las propiedades mecánicas encontradas en la sección anterior.

3.2.1. Cálculo de la densidad aparente del bambú.

Este estudio tiene como objetivo cuantificar la distribución de la densidad del bambú por medio del uso de tomografía computarizada de rayos X.

Para el cálculo de la densidad se hizo un estudio sistemático de análisis de imagen de los tomogramas obtenidos donde se analizó el valor de grises (Gs) de la imagen digital tomográfica. La escala de grises va desde 0 bits (blanco) a 255 bits (negro). Se tomó como referencia un valor en la escala de grises con materiales de densidades conocidas, en este caso los materiales utilizados fueron agua ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) y polipropileno ($\rho = 910 \text{ kg/m}^3$); mediante una curva de calibración que contiene información del valor de grises (correspondiente a la intensidad atenuada de los rayos X) respecto a la densidad, se infiere (según el valor obtenido de Gs) la densidad del material. A continuación, se hace una descripción detallada de los pasos que se siguieron en este procedimiento:

1. Se abre la imagen con terminación tif (figura 3.40) la cual fue previamente obtenida por el programa Volume Graphics, en el software ImageJ, después se transforma en una imagen de 8 bits (el cual contiene una tonalidad de 256 valores de grises).

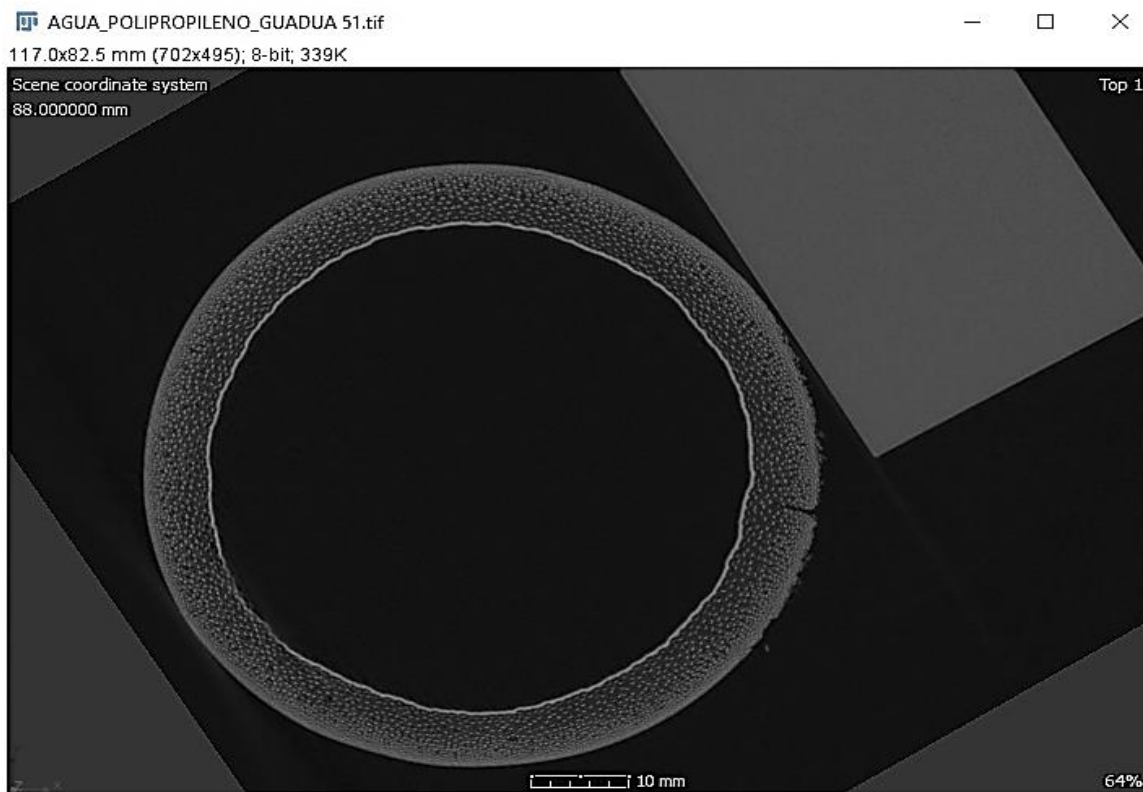


Figura 3.40. Imagen tomográfica del bambú *Guadua angustifolia* a 8 bits.

2. Se procedió a seleccionar mediante la barra de herramientas (figura 3.41) el área a medir (puede ser puntual, lineal, rectangular, o circular).

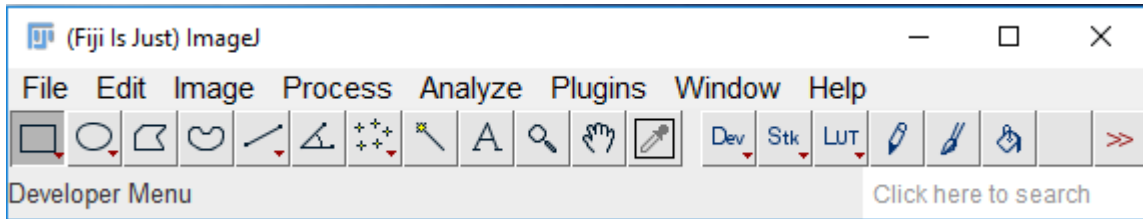


Figura 3.41. Barra de herramientas de ImageJ.

3. Una vez seleccionada el área se selecciona la sección de analyze → set measurements (Figura 3.42) donde establecemos los parámetros a medir.

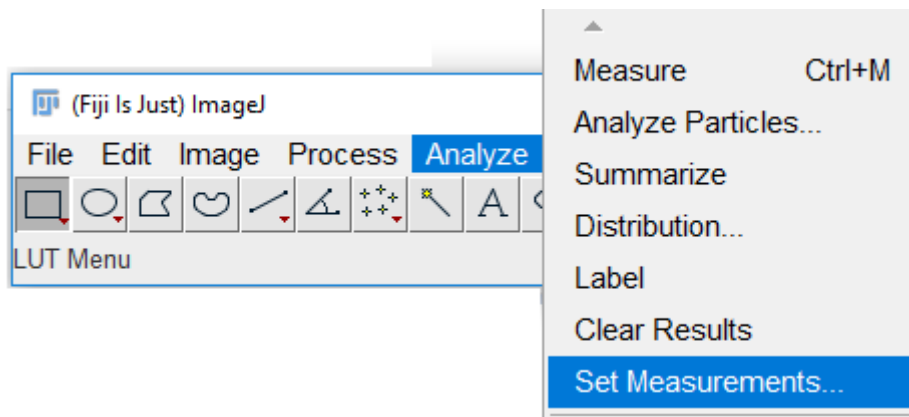


Figura 3.42. analyze → set measurements.

4. Una vez establecidos los parámetros, se regresa a analyze → measure (figura 3.43), para realizar las mediciones. Al terminar se despliega una tabla con los datos del área seleccionada y valores de grises.

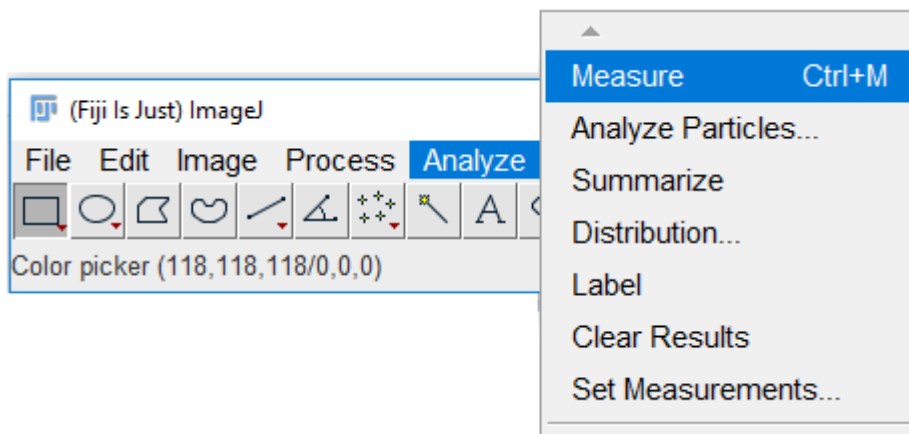


Figura 3.43. analyze → measure

Con los valores de G_s obtenidos se obtiene el valor de la densidad aparente correspondiente. Este procedimiento se realizó para 3 especies de bambú: *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* y *Oatea acuminata*.

3.2.2. Cálculo de la densidad de la especie *Guadua angustifolia*.

Para la obtención de los valores de G_s del agua (figura 3.44) mostrados en la tabla 3.13 se estudiaron 5 planos (4 mm de distancia entre plano y plano) en la dirección longitudinal, es decir, dentro del volumen del material.

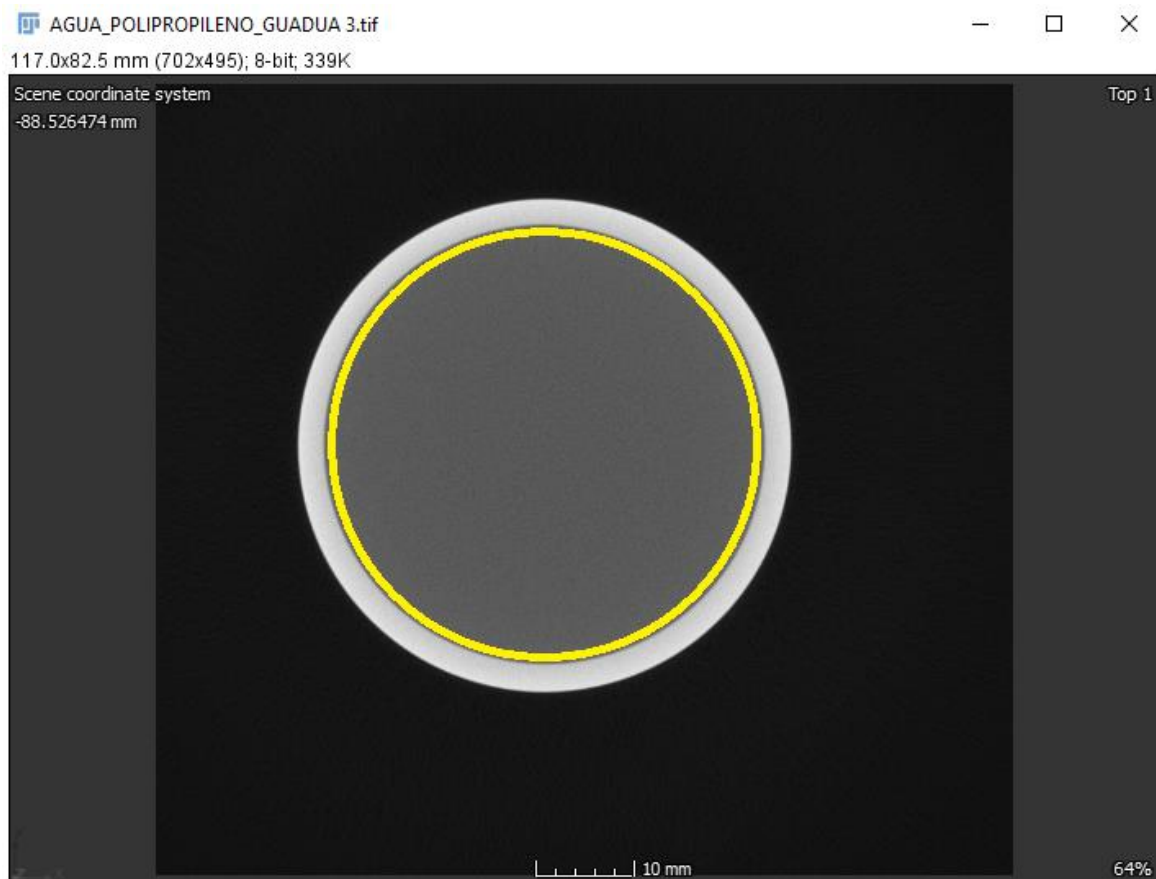


Figura 3.44. Plano de una sección de una imagen tomográfica del agua.

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | X | Y | Perim. | %Área |
|-------|------|--------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 1521 | 90.584 | 3.57 | 90 | 80 | 108 | 54.33 | 44.83 | 138.23 | 100 |
| 2 | 1521 | 90.622 | 3.82 | 89 | 78 | 112 | 54.33 | 44.50 | 145.54 | 100 |
| 3 | 1521 | 90.816 | 4.13 | 90 | 78 | 124 | 54.50 | 44.33 | 138.23 | 100 |
| 4 | 1521 | 90.701 | 3.99 | 89 | 77 | 130 | 54.50 | 44.33 | 145.54 | 100 |
| 5 | 1521 | 90.171 | 3.72 | 89 | 78 | 109 | 54.67 | 44.17 | 145.54 | 100 |

Tabla 3.13. Sustancia agua.

Se obtuvo un promedio $G_s = 90.5788$ que corresponde a la densidad del agua. Como se puede observar, los valores de G_s son casi iguales independientemente del plano analizado, lo que confirma que la densidad del agua es homogénea. Para el polipropileno (figura 3.45) mostrados en la tabla 3.14, se estudiaron 6 planos aleatorios (aprox. 5 mm entre plano y plano).

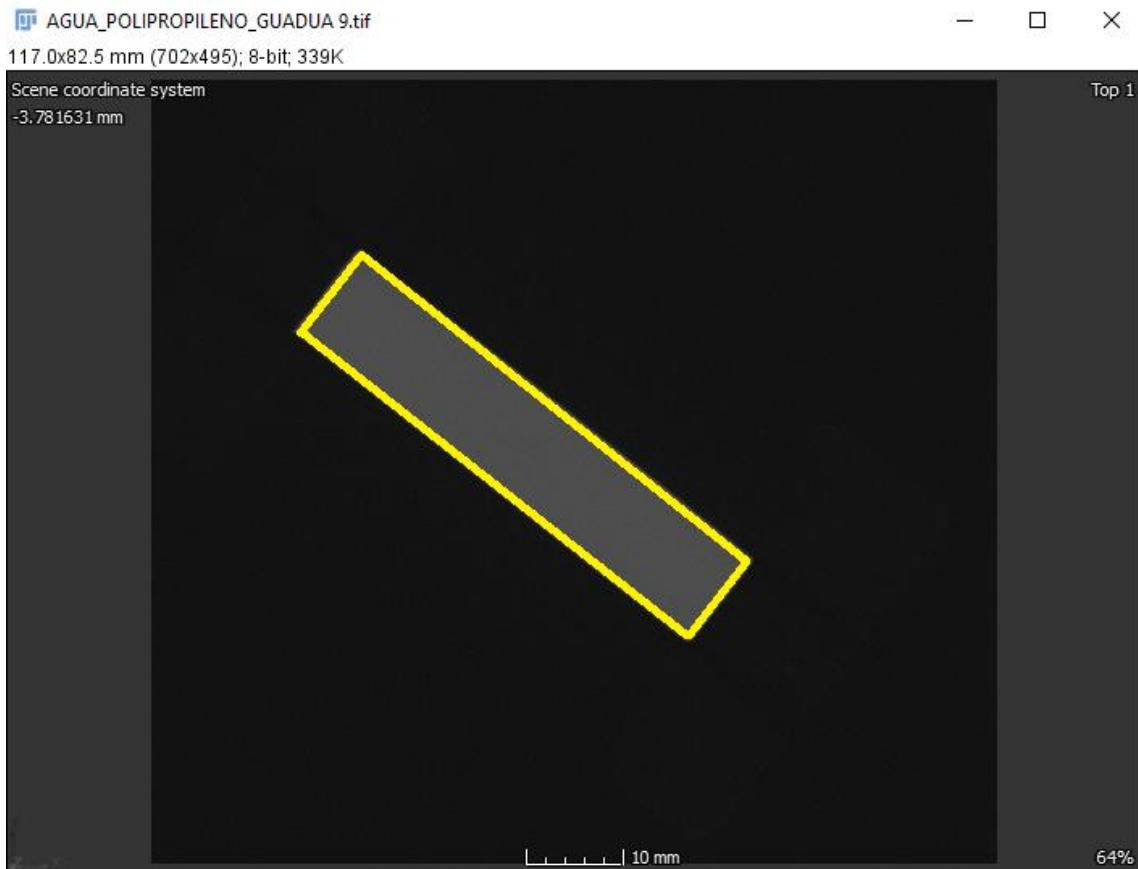


Figura 3.45. Plano de una sección de una imagen tomográfica del polipropileno.

De la tabla 3.14 se obtiene un valor G_s promedio de 77.94 que corresponde a la densidad del polipropileno de 910 kg/m^3 , se observa que este material también es muy homogéneo.

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | X | Y | Perim. | %Área |
|-------|--------|--------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|
| 1 | 508.66 | 77.47 | 1.47 | 78 | 70 | 83 | 53.33 | 43.66 | 81.42 | 100 |
| 2 | 508.66 | 78.022 | 1.63 | 78 | 71 | 84 | 53.50 | 44.16 | 81.42 | 100 |
| 3 | 508.66 | 78.117 | 1.44 | 78 | 72 | 84 | 53.66 | 44.83 | 81.42 | 100 |
| 4 | 508.66 | 78.105 | 1.51 | 78 | 71 | 84 | 53.66 | 45.16 | 81.42 | 100 |
| 5 | 508.66 | 78.072 | 1.32 | 78 | 72 | 83 | 53.83 | 45.66 | 81.42 | 100 |
| 6 | 508.66 | 77.875 | 1.31 | 78 | 72 | 83 | 54.16 | 45.83 | 81.42 | 100 |

Tabla 3.14 Material polipropileno.

Por último, se estudiaron 6 planos (figura 3.46) para el bambú Guadua (distancia entre planos 1 mm), donde cada plano analizado está en la dirección longitudinal, es decir en el entrenudo. En la tabla 3.15 se presenta los valores obtenidos.

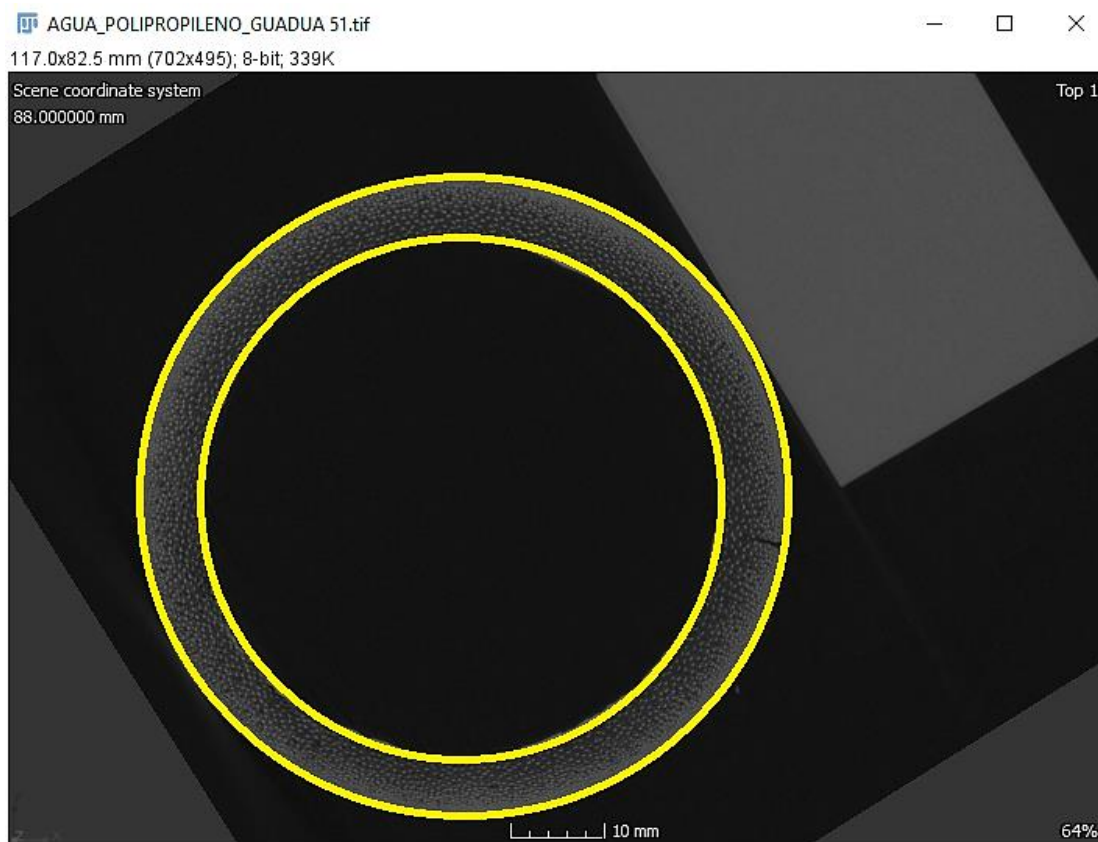


Figura 3.46. Plano en la dirección radial de una imagen tomográfica del Guadua angustifolia.

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | X | Y | Perim. |
|-------|---------|--------|-------|------|------|------|-------|-------|--------|
| 1 | 1154.75 | 57.99 | 15.37 | 42 | 21 | 109 | 48.34 | 37.17 | 411.14 |
| 2 | 1154.75 | 58.03 | 15.23 | 42 | 14 | 113 | 47.46 | 36.29 | 411.14 |
| 3 | 1154.75 | 58.641 | 15.26 | 44 | 21 | 107 | 47.82 | 37.53 | 411.14 |
| 4 | 1154.75 | 59.166 | 15.31 | 44 | 23 | 107 | 47.48 | 36.65 | 411.14 |
| 5 | 1154.75 | 59.976 | 15.44 | 48 | 23 | 111 | 46.24 | 36.46 | 411.14 |
| 6 | 1154.75 | 60.302 | 15.47 | 47 | 20 | 111 | 46.22 | 38.06 | 411.14 |

Tabla 3.15. Especie *Guadua angustifolia*.

De la tabla 3.15 se obtiene un Gs promedio de 59.02, el cual corresponde a una densidad 775.19 kg/m³, obtenido de la figura 3.47, curva de calibración. En la tabla 3.16 se muestra la densidad aparente promedio obtenida por los planos radiales a lo largo de la dirección del culmo. Los resultados de estos 3 materiales se presentan en la tabla 3.17.

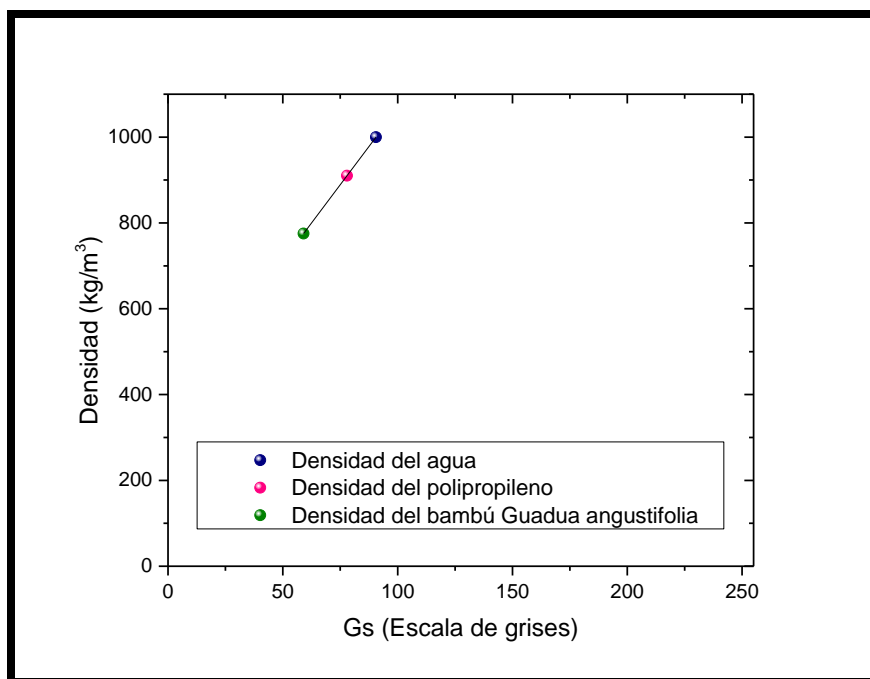


Figura 3.47. Densidad de los diferentes materiales.

| Especie <i>Guadua angustifolia</i> | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Plano 1 | 767.87318 | 57.99 |
| Plano 2 | 768.1581 | 58.03 |
| Plano 3 | 772.51019 | 58.641 |
| Plano 4 | 776.24971 | 59.166 |
| Plano 5 | 782.01926 | 59.976 |
| Plano 6 | 784.34133 | 60.302 |

Tabla 3.16. Valores de la densidad en la dirección longitudinal del bambú *Guadua angustifolia* en 6 planos diferentes.

| Material | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|---------------------|-------------------------------|------------------------|
| Agua | 1000 | 90.5788 |
| Polipropileno | 910 | 77.9435 |
| Guadua angustifolia | 775.1919 | 59.0175 |

Tabla 3.17 Valor de la densidad aparente (planos radiales) de la especie Guadua angustifolia.

Los resultados mostraron que la especie Guadua angustifolia tiene menor densidad que el agua y el polipropileno.

Por otro lado, se hizo un análisis sistemático del perfil de densidad de la especie Guadua angustifolia en la dirección radial. Para dicho análisis los valores de Gs variaron en la dirección radial del bambú Guadua angustifolia. En la imagen de la figura 3.48 se muestran anillos concéntricos donde la distancia entre ellos es de 2mm, por lo que la densidad en cada sección fue analizada por medio del valor promedio del Gs, con el mismo procedimiento de la sección anterior.



Figura 3.48. Secciones del radio interior al exterior para el cálculo del perfil de densidades.

La tabla 3.18 muestra los valores de la densidad estimada desde el radio interior al radio exterior. De aquí se obtiene el perfil de densidad del bambú *Guadua angustifolia* en la dirección radial (figura 3.49) donde se observa que la densidad es mayor en el radio exterior respecto al radio interior, cuyos valores van de 693 kg/m³ hasta 851 kg/m³.

| Guadua angustifolia Radio (mm) | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 31.37 - 32.39 | 851.9804 | 69.798 |
| 30.36 - 31.37 | 781.6631 | 59.926 |
| 29.42 - 30.36 | 725.3921 | 52.026 |
| 28.62 - 29.42 | 696.2666 | 47.937 |
| 27.82 - 28.62 | 693.5314 | 47.553 |

Tabla 3.18. Valores de la densidad en la dirección radial del radio exterior-interior.

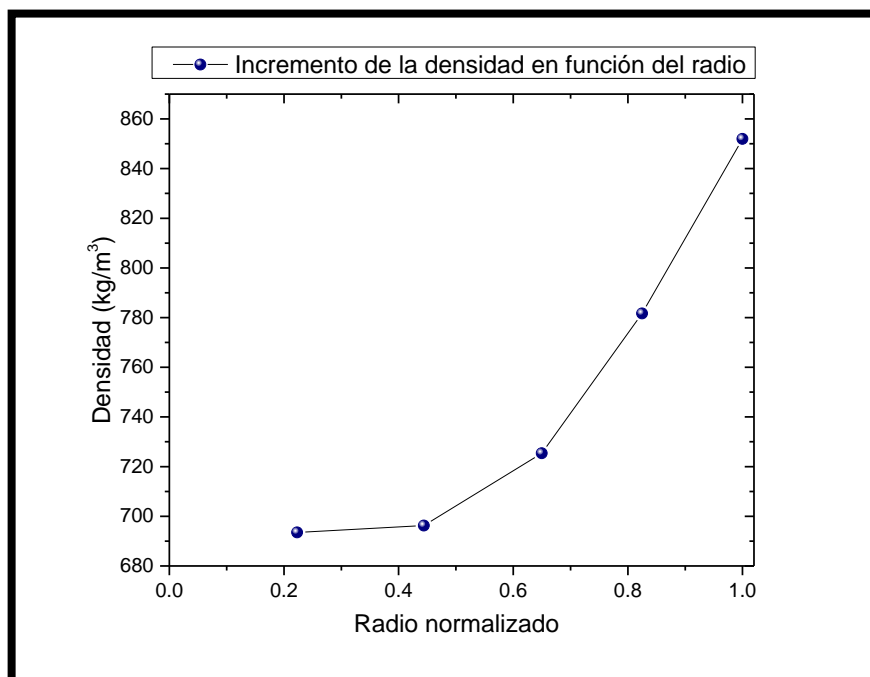


Figura 3.49. Perfil de densidades en la dirección radial del bambú *Guadua angustifolia*.

Cabe mencionar que, en cada sección, en la dirección radial, se obtuvo una distribución del valor del número de grises (Gs) por cada área de la sección (tabla 3.18), es decir, se obtiene un histograma de frecuencias. Las figuras 3.50 – 3.54 muestran dichos histogramas para cada una de las secciones analizadas. Por lo que el valor Gs, relacionado con la densidad del material, es la media de la distribución. Los resultados obtenidos muestran que las densidades de las fibras aumentan gradualmente desde el interior hacia el exterior, así como desde la parte inferior a la

parte superior de un tallo de bambú. Con estos resultados podemos inferir que la densidad de volumen de las fibras y su distribución, nos dan información importante sobre las propiedades mecánico-morfológicas.

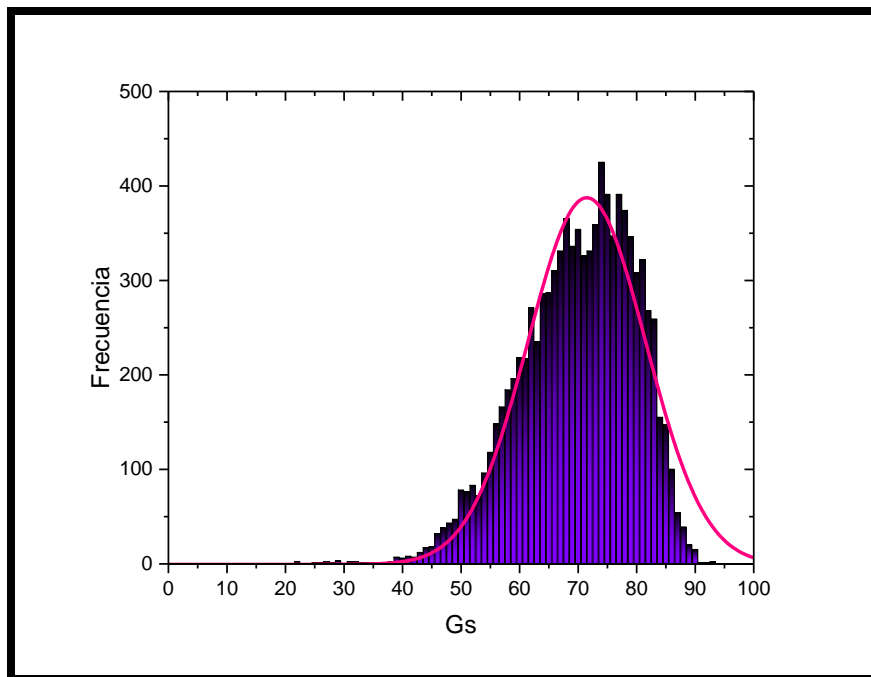


Figura 3.50. Distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú. Rango [31.37 - 32.39] mm.

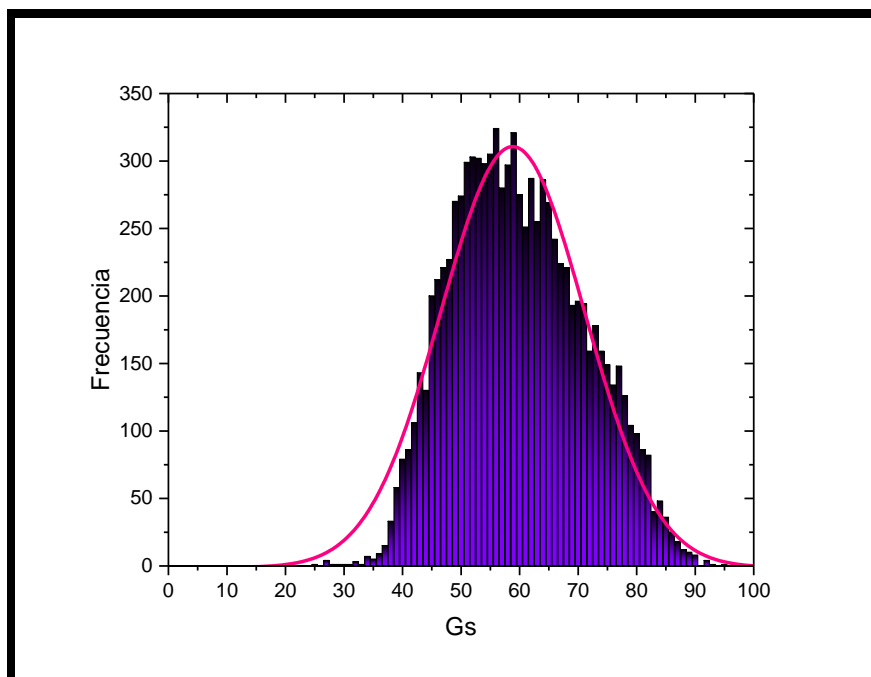


Figura 3.51. Distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú. Rango [30.36 - 31.37] mm.

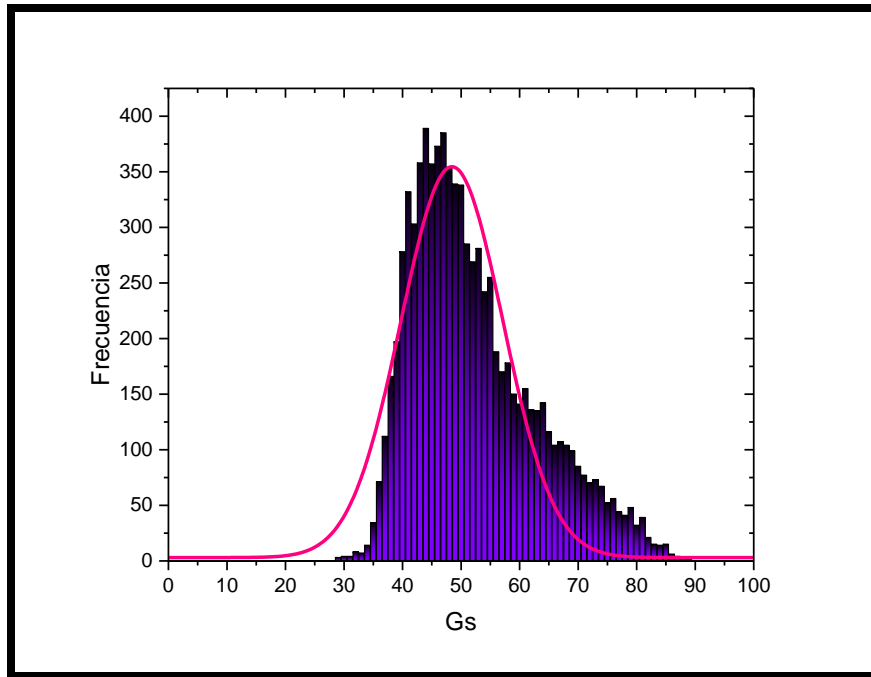


Figura 3.52. Distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú. Rango [29.42 - 30.36] mm.

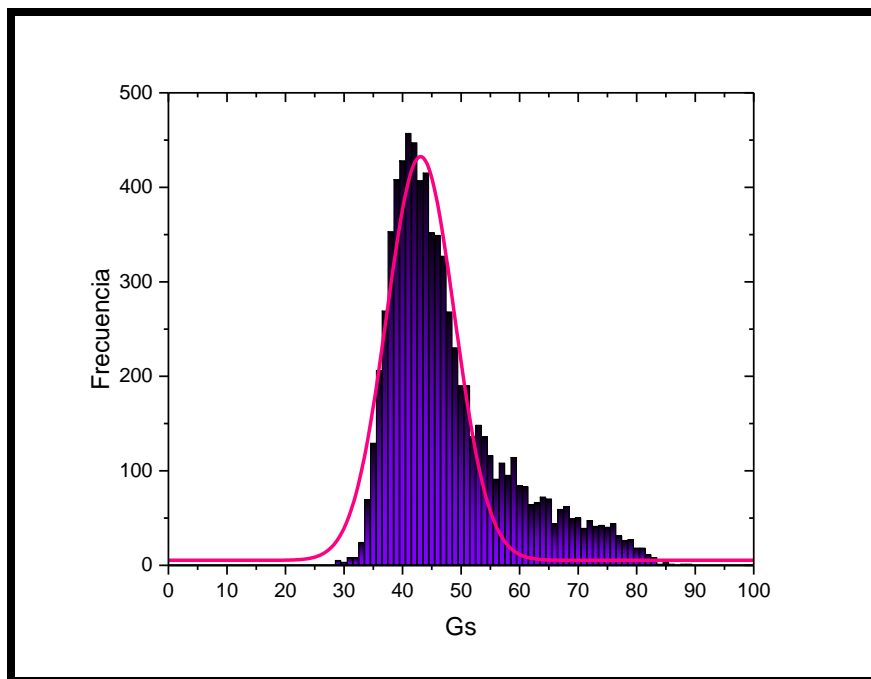


Figura 3.53. Distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú. Rango [28.62 - 29.42] mm.

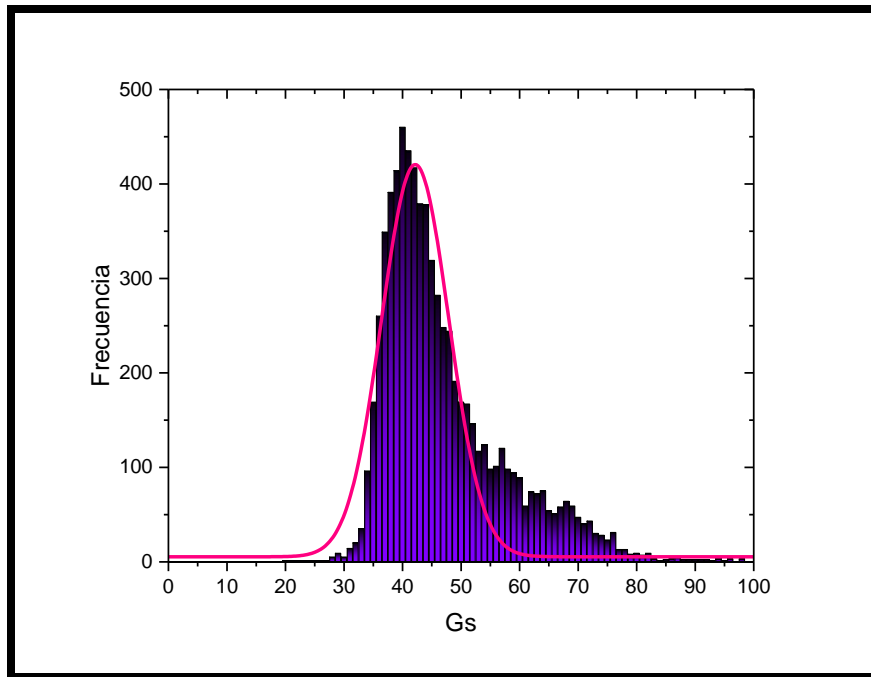


Figura 3.54. Distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú. Rango [27.82 – 28.62] mm.

En las siguientes secciones se muestran las densidades de la especie *Bambusa oldhamii* en el entrenudo y nudo, así como el de la especie *Otatea acuminata*, usando el mismo método propuesto para la especie *Guadua angustifolia*.

3.2.3. Cálculo de la densidad de la especie *Bambusa oldhamii* en el entrenudo.

En este caso se hicieron medidas de la densidad (tabla 3.19) del entrenudo, se consideraron 10 planos radiales en la dirección longitudinal. El promedio de Gs se obtiene en la tabla 3.20. Realizando el mismo procedimiento que en la sección anterior sobre la curva de calibración con los materiales de densidades conocidas, se obtiene que la especie *Bambusa oldhamii* también tiene una densidad menor que la del agua y del polipropileno, que es un resultado esperado, ver tabla 3.20 y figura 3.55. Además, la densidad aparente de la especie *Bambusa oldhamii* presenta una mayor densidad que la de *Guadua angustifolia* y esto podría explicar porque la especie *Bambusa oldhamii* tiene un mayor módulo de Young que la especie *Guadua angustifolia*.

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | Perim. |
|-------|---------|--------|--------|------|------|------|---------|
| 1 | 760.738 | 65.286 | 9.47 | 66 | 21 | 95 | 226.371 |
| 2 | 760.738 | 65.299 | 9.366 | 66 | 21 | 95 | 226.371 |
| 3 | 760.738 | 65.271 | 9.797 | 66 | 18 | 93 | 226.371 |
| 4 | 760.738 | 65.729 | 9.613 | 66 | 31 | 94 | 226.371 |
| 5 | 760.738 | 65.525 | 9.496 | 70 | 21 | 94 | 226.371 |
| 6 | 760.738 | 65.769 | 9.558 | 64 | 28 | 93 | 226.371 |
| 7 | 760.738 | 65.532 | 9.557 | 66 | 21 | 95 | 226.371 |
| 8 | 760.738 | 65.615 | 10.188 | 68 | 18 | 93 | 226.371 |
| 9 | 760.738 | 65.671 | 9.464 | 68 | 25 | 92 | 226.371 |
| 10 | 760.738 | 65.713 | 9.547 | 65 | 20 | 93 | 226.371 |

Tabla 3.19. Bambú *Bambusa oldhamii*.

| Material | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Agua | 1000 | 81.88 |
| Polipropileno | 910 | 70.751 |
| <i>Bambusa Oldhamii</i> | 867.8668 | 65.541 |

Tabla 3.20. Valores de Gs de los materiales (promedio).

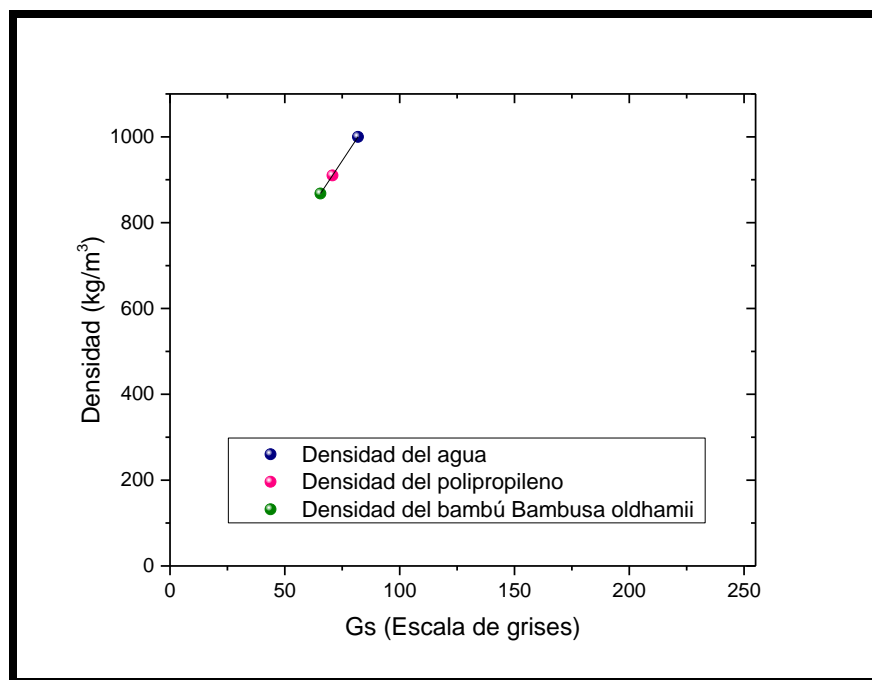


Figura 3.55. Densidad de la especie *Bambusa oldhamii*.

Por otro lado, se realizó el análisis del perfil de densidades en el entrenudo, donde se tomaron 10 secciones de círculos concéntricos desde el radio interior al radio exterior (figura 3.56) teniendo cada sección un grosor de 1 mm. Los resultados del

perfil de densidad se muestran en la tabla 3.21 y figura 3.57. Se observa que la densidad varía de 824 kg/m^3 (radio interior) hasta cerca de la densidad del agua en el radio exterior. Como ejemplo se presenta la distribución del número de grises de un área representativa en la dirección radial del bambú, en un rango [22 - 23] mm. (figura 3.58).

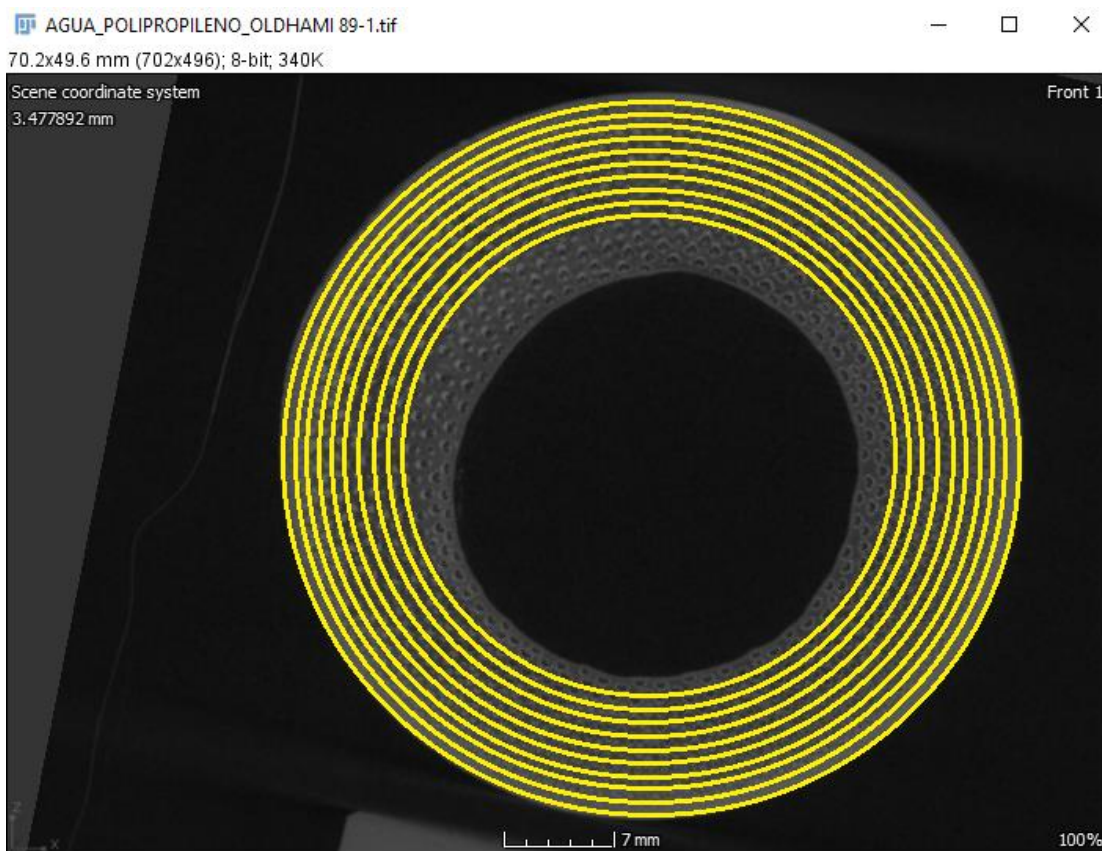


Figura 3.56. secciones del radio interior al exterior para el cálculo del perfil de densidades.

| Bambusa Oldhamii Radio (mm) | Densidad kg/m^3 | Escala de grises Gs |
|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 22 - 23 | 996.595381 | 81.459 |
| 21 - 22 | 960.15545 | 76.953 |
| 20 - 21 | 921.871687 | 72.219 |
| 19 - 20 | 895.11187 | 68.91 |
| 18 - 19 | 876.859556 | 66.653 |
| 17 - 18 | 867.648486 | 65.514 |
| 16 - 17 | 862.189774 | 64.839 |
| 15 -16 | 855.170276 | 63.971 |
| 14 - 15 | 824.997754 | 60.24 |

Tabla 3.21. Valores de la densidad en la dirección radial del radio exterior-interior.

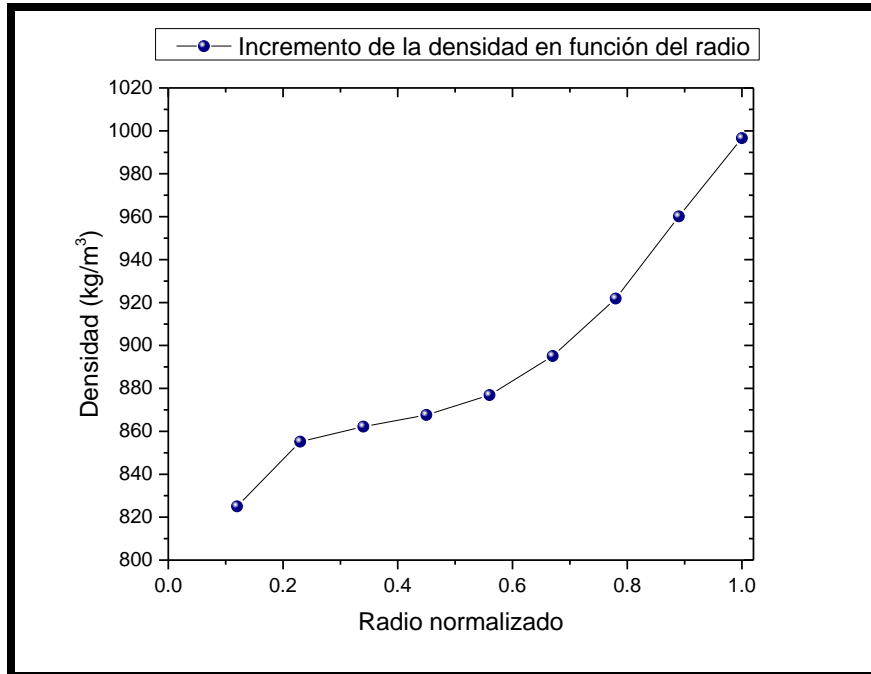


Figura 3.57. Perfil de densidades en la dirección radial del bambú *Bambusa oldhamii* en el entrenudo.

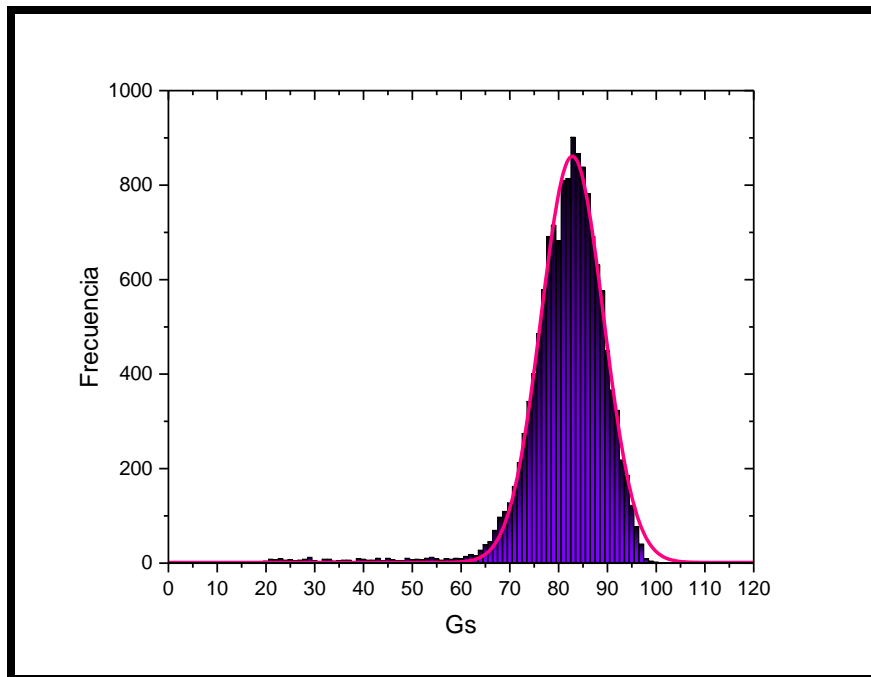


Figura 3.58. Distribución del número de grises de un área representativa de la sección transversal (en la dirección radial del bambú). Rango [22 – 23] mm.

Ahora bien, en la siguiente sección se mostrará la densidad de este bambú, pero fuera del entrenudo, es decir en el nudo.

3.2.4. Cálculo de la densidad de la especie *Bambusa oldhamii* en el nudo.

Para el cálculo de la densidad de la especie *Bambusa oldhamii* en el nudo se consideraron 5 planos donde se obtuvieron los valores de Gs (tabla 3.22) y por medio de la curva de calibración se infiere una densidad aparente del material alrededor de 877 kg/m³ (tabla 3.23 y figura 3.59).

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | Perim. | Mediana |
|-------|----------|--------|--------|------|------|------|---------|---------|
| 1 | 1254.592 | 66.729 | 13.637 | 57 | 29 | 104 | 183.526 | 63 |
| 2 | 1254.592 | 66.557 | 13.8 | 56 | 29 | 102 | 183.526 | 63 |
| 3 | 1254.592 | 66.722 | 13.728 | 57 | 26 | 101 | 183.526 | 64 |
| 4 | 1254.592 | 66.693 | 13.739 | 56 | 27 | 103 | 183.526 | 63 |
| 5 | 1254.592 | 66.663 | 13.637 | 55 | 19 | 104 | 183.526 | 63 |

Tabla 3.22. Valores de Gs del bambú *Bambusa oldhamii* en el nudo.

| Material | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Agua | 1000 | 81.88 |
| Polipropileno | 910 | 70.751 |
| <i>Bambusa Oldhamii</i> | 877.0196 | 66.6728 |

Tabla 3.23. Valores de Gs de los materiales (promedio) en el nudo.

De estos resultados se observa que el nudo es más denso que en el entrenudo, lo que puede explicar que los resultados de compresión sean reproducibles en el caso con nudo que el caso sin nudo. Además, estos valores se pueden deber a la forma de las orientaciones que van tomando las fibras al acercarse al nudo. Tal como lo podemos ver en la figura 3.39.b.

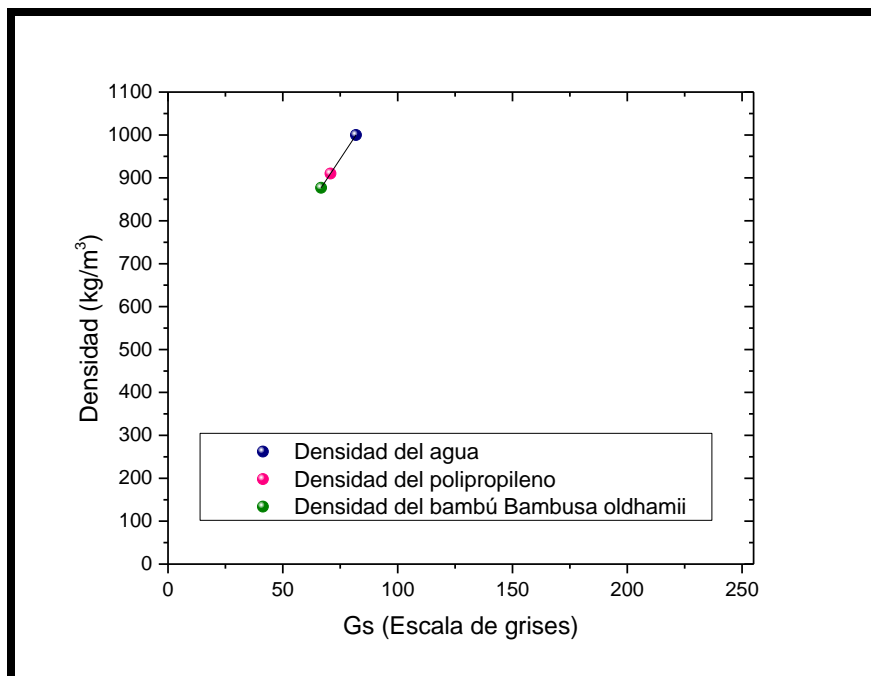


Figura 3.59. Densidad en el nudo del bambú *Bambusa oldhamii*.

Para el análisis de los valores de Gs en la dirección radial del bambú *Bambusa oldhamii* en el nudo realizamos secciones del radio interior al radio exterior con un ancho entre secciones de 2.5 mm, los resultados se muestran en la tabla 3.23. El perfil de densidades se muestra en la figura 3.60. Sorprendentemente se observó que la densidad del oldhamii es bastante homogénea en el nudo, es decir no hay un cambio significativo entre la densidad del radio interior y el radio exterior. Y esto se puede deber a que el nudo es una sección estrecha donde las fibras se concentran (o colapsan) cambiando de dirección para luego extenderse en forma recta a lo largo del culmo nuevamente.

| Bambusa Oldhamii Radio (mm) | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 17.5 - 20 | 877.47417 | 66.729 |
| 15 - 17.5 | 877.44182 | 66.725 |
| 12.5 - 15 | 877.41756 | 66.722 |
| 10 - 12.5 | 877.18304 | 66.693 |

Tabla 3.24. Valores de la densidad en la dirección radial del radio interior al exterior.

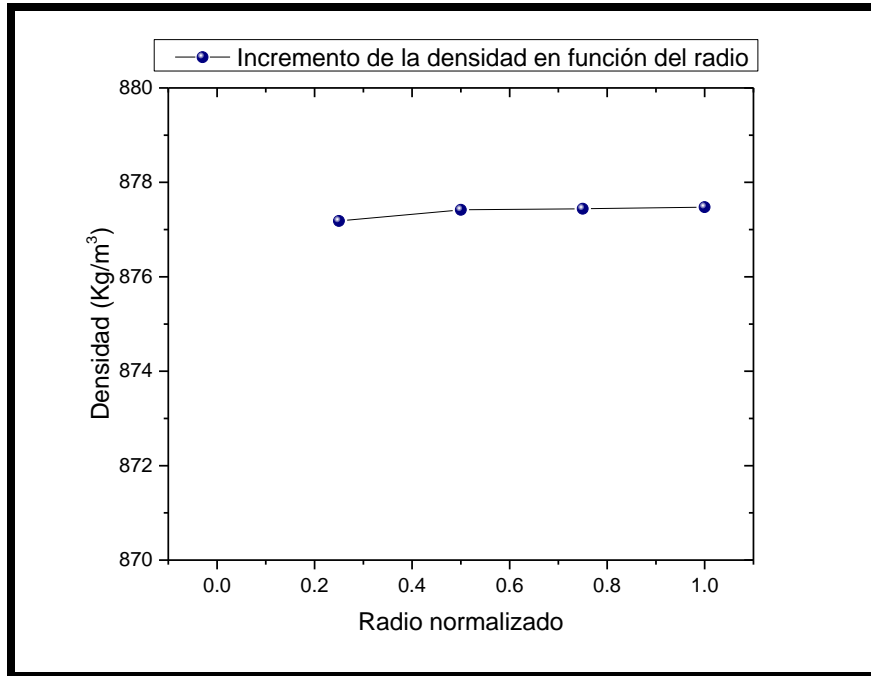


Figura 3.60. Perfil de densidades en la dirección radial de la especie *Bambusa oldhamii* en el nudo.

Por último, se muestra la estimación de la densidad aparente, así como el perfil de densidad radial de la especie *Otatea acuminata*.

3.2.5. Cálculo de la densidad de la especie *Otatea acuminata*.

Para el cálculo de la densidad de la especie *Otatea acuminata* se consideraron 15 planos en diferentes posiciones a lo largo del culmo del bambú donde se obtiene el promedio de G_s para cada plano (tabla 3.25).

Por otro lado, los valores de la densidad para este bambú se muestran en la tabla 3.26 y figura 3.61, donde de igual forma es menor que las densidades del agua y polipropileno. Como se puede observar, la densidad de la especie *Otatea acuminata* es muy similar a la de la especie *Bambusa oldhamii*.

| Plano | Área | Media | SD | Moda | Min. | Max. | Perim. | Mediana |
|-------|--------|--------|-------|------|------|------|--------|---------|
| 1 | 178.36 | 42.544 | 9.81 | 46 | 10 | 61 | 49.76 | 45 |
| 2 | 178.36 | 42.425 | 9.96 | 46 | 10 | 61 | 49.76 | 45 |
| 3 | 178.36 | 42.083 | 9.83 | 46 | 10 | 60 | 49.76 | 45 |
| 4 | 178.36 | 41.956 | 9.74 | 47 | 11 | 60 | 49.76 | 44 |
| 5 | 178.36 | 41.933 | 9.72 | 45 | 10 | 62 | 47.35 | 44 |
| 6 | 178.36 | 42.357 | 9.79 | 47 | 11 | 62 | 49.76 | 44 |
| 7 | 178.36 | 43.482 | 10.32 | 47 | 10 | 65 | 49.76 | 46 |
| 8 | 178.36 | 45.005 | 10.47 | 50 | 10 | 65 | 49.76 | 47 |
| 9 | 178.36 | 46.913 | 9.53 | 48 | 13 | 69 | 49.76 | 48 |
| 10 | 178.36 | 49.728 | 8.42 | 54 | 22 | 71 | 49.76 | 50 |
| 11 | 178.36 | 51.397 | 7.26 | 56 | 33 | 71 | 49.76 | 52 |
| 12 | 178.36 | 51.157 | 7.04 | 47 | 33 | 73 | 49.76 | 51 |
| 13 | 178.36 | 50.109 | 7.42 | 49 | 31 | 72 | 49.76 | 50 |
| 14 | 178.36 | 49.084 | 7.81 | 46 | 31 | 75 | 49.76 | 48 |
| 15 | 178.36 | 48.378 | 7.99 | 45 | 29 | 74 | 49.76 | 47 |

Tabla 3.25. Especie Otatea acuminata.

| Material | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|------------------|-------------------------------|------------------------|
| Agua | 1000 | 71.249 |
| Polipropileno | 910 | 52.291 |
| Otatea acuminata | 879.6759 | 45.9034 |

Tabla 3.26. Valores de Gs de los materiales (promedio).

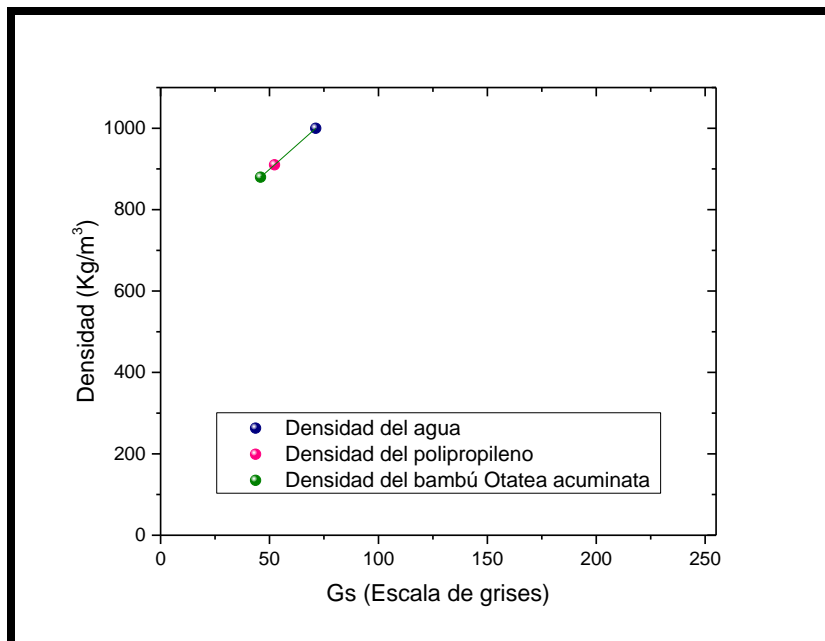


Figura 3.61. Densidad de la especie Otatea acuminata.

Sin embargo, cabe mencionar que en este caso la densidad de cada sección transversal, a diferentes posiciones a lo largo de la longitud del bambú, varía mucho más que el bambú *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii* (ver figura 3.62), lo que sugiere un gradiente de densidad mayor a lo largo del culmo y puede estar relacionado con la distribución de las fibras.

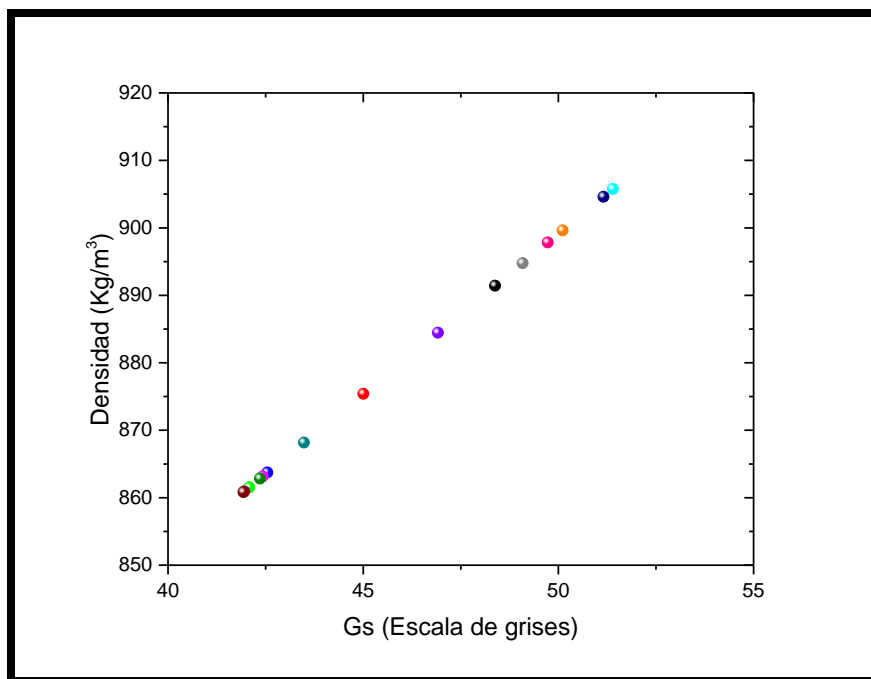


Figura 3.62. Variación de la densidad en la dirección longitudinal del bambú *Otatea acuminata*.

Ahora bien, el perfil de densidad de la especie *Otatea acuminata* se muestra en la figura 3.63 y tabla 3.27, donde existe un gradiente de densidad menor que en el caso de *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii* (entrenudo) cuyos valores de densidad son más cercanos con la especie *Bambusa oldhamii*. De estos resultados podemos inferir que las densidades juegan un papel muy importante en los esfuerzos de tensión, es decir, que las densidades mayores (*Bambusa oldhamii* y *Otatea acuminata*) tienen mayor módulo de Young que la especie de menor densidad (*Guadua angustifolia*). Sin embargo, en los esfuerzos por compresión, se observó que la especie *Guadua angustifolia* que tiene menor densidad que la *Otatea acuminata*, contribuye con un módulo de Young Mayor. Este resultado puede deberse a la forma en cómo la densidad de las fibras se distribuye a lo largo del culmo, es decir de una forma más homogénea.

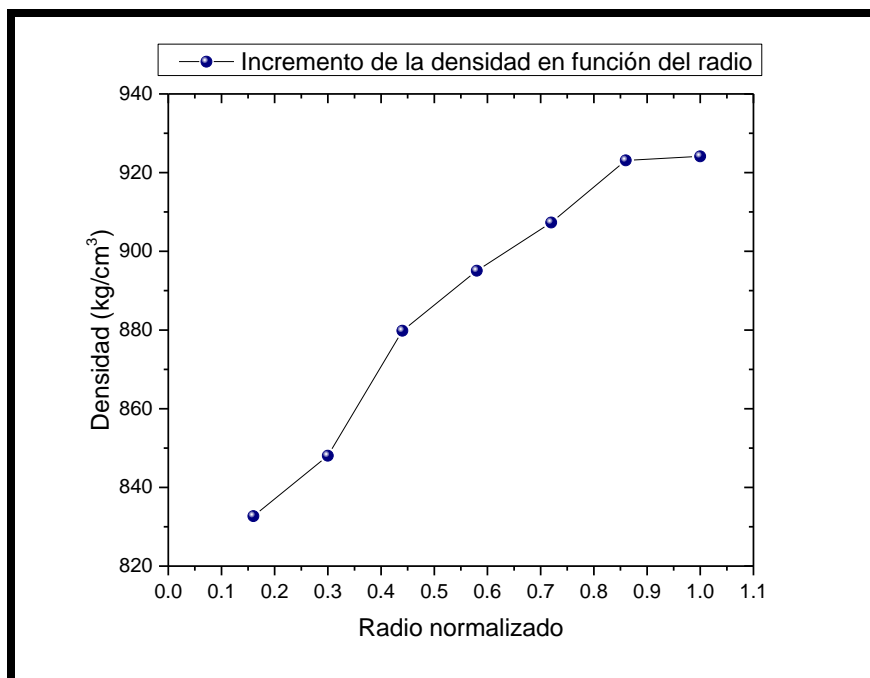


Figura 3.63. Densidades en la dirección radial de la especie *Otatea acuminata*.

| <i>Otatea acuminata</i> Radio (mm) | Densidad kg/m ³ | Escala de grises Gs |
|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 14-16 | 924.1423 | 55.27 |
| 12-14 | 923.0979 | 55.05 |
| 10-12 | 907.3225 | 51.727 |
| 8-10 | 895.0696 | 49.146 |
| 6-8 | 879.8259 | 45.935 |
| 4-6 | 848.0330 | 39.238 |
| 2-4 | 832.6944 | 36.007 |

Tabla 3.27. Valores de la densidad en la dirección radial de la especie *Otatea acuminata*.

Como se mostró anteriormente el perfil de densidades en la dirección radial para las tres especies se incrementa (figura 3.64), la especie *Bambusa oldhamii* presenta un mayor rango de variación en la densidad del radio interior al radio exterior en el entrenudo mientras que la densidad en el nudo es constante.

En la figura 3.64 se comparan los perfiles de densidades de cada uno de los bambús (normalizando el radio). Se observa que la densidad de la especie *Otatea acuminata*, así como la *Bambusa oldhamii*, crece linealmente respecto al radio, es decir el

gradiente de densidad es constante y en el nudo (caso *Bambusa oldhamii*) el gradiente de densidad es cero. Sin embargo, para el caso de *Guadua angustifolia* el comportamiento sigue una función no lineal y el gradiente de densidad no es constante.

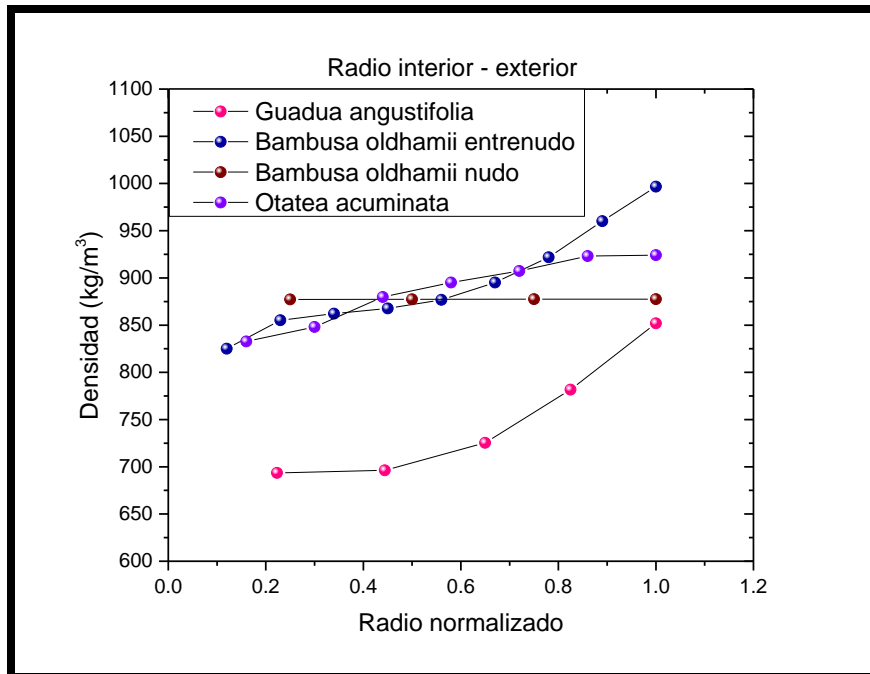


Figura 3.64. Perfil de densidades de las tres especies: *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* (en el entrenudo y nudo), y *Otatea acuminata*.

Ahora bien, en orden de comparar los esfuerzos a la tensión y compresión con la densidad de los bambúes, se realizó una gráfica de la densidad aparente respecto al módulo de Young para cada especie, ver figura 3.65 y 3.66.

Los resultados de las figuras 3.65 y 3.66 muestran que el módulo de Young o la resistencia del material a esfuerzos de tensión y compresión no depende solamente de la densidad aparente del material, lo que sugiere que las propiedades físicas de las fibras, la estructura interna y el gradiente de la densidad del bambú a lo largo de la dirección radial y longitudinal del bambú, son parámetros importantes que debemos tener en consideración. El comportamiento de la densidad en la dirección radial para cada especie se resume de la siguiente manera: a) la densidad de las partes del entrenudo oscila entre 693.53 kg/m³ y 851.98 kg/m³ para *Guadua angustifolia*, b) *Bambusa oldhamii* toma el rango de 824.99 - 996.59 kg/m³ y c) *Otatea acuminata* el de 832.69 - 924.14 kg/m³. El rango para la especie *Bambusa oldhamii* en el nudo no varía. En la dirección longitudinal, el rango de densidad es de 767.87 kg/m³ a 784.34 kg/m³ para la *Guadua angustifolia*, de 865.68 kg/m³ a 869.38 kg/m³ para la *Bambusa oldhamii*, mientras que en el caso de la *Otatea acuminata* hay un cambio significativo que va de 860.82 kg/m³ a 905.75 kg/m³.

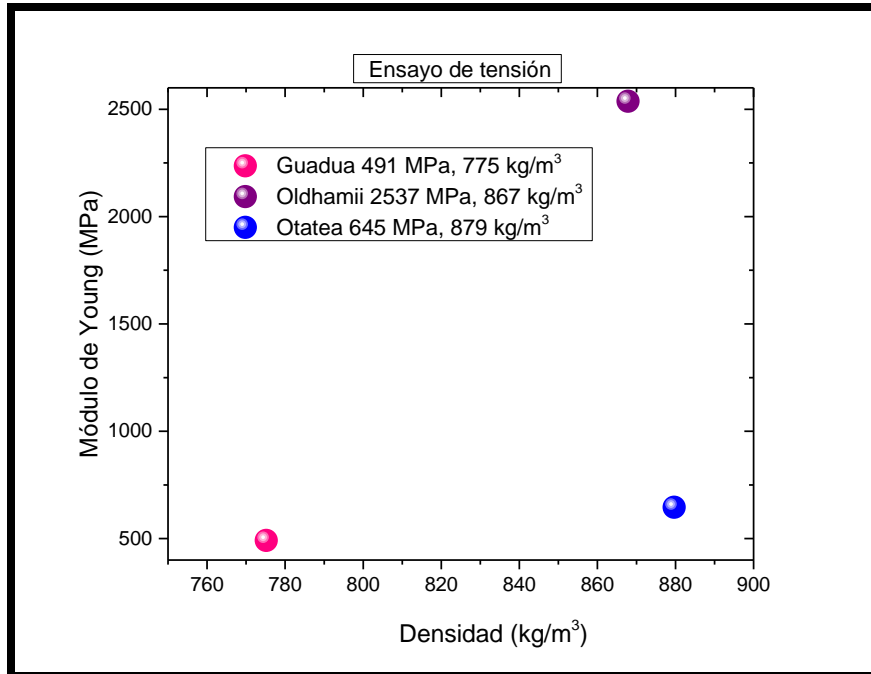


Figura 3.65. Módulo de Young respecto a la densidad de cada especie, para los ensayos de tensión. Especies: *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii*, *Otatea acuminata*.

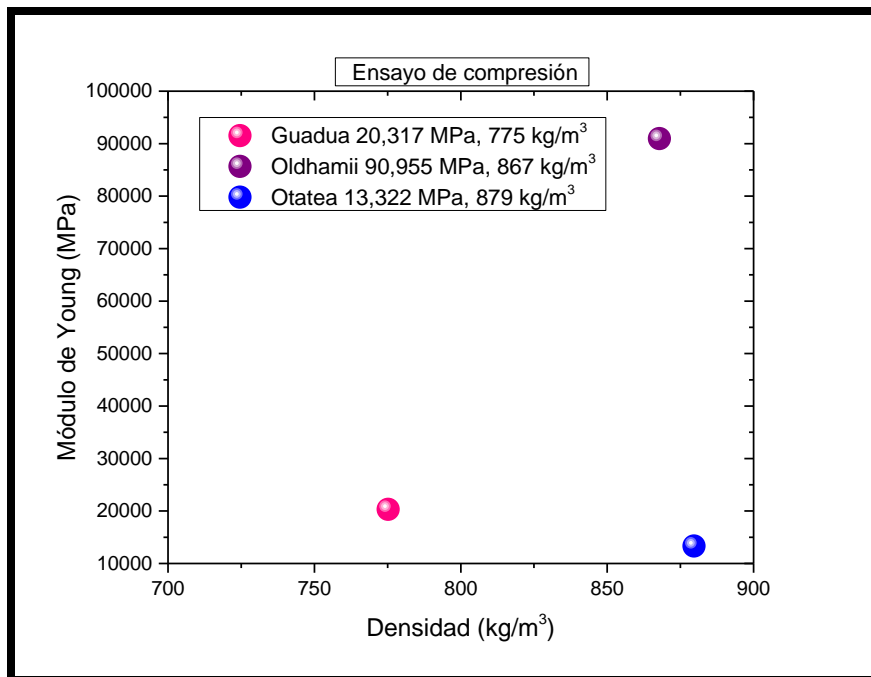


Figura 3.66. Módulo de Young respecto a la densidad de cada especie, para los ensayos de compresión. Especies: *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii*, *Otatea acuminata*.

Además, otros autores han realizado experimentos para determinar la densidad del bambú con técnicas experimentales convencionales, los cuales se muestran en la tabla 3.28 para diferentes especies de Bambú. Por ejemplo, en el trabajo de Zaragoza-Hernandez²⁷ determinaron un valor mínimo de densidad de 370 kg/m³ y un máximo de 920 kg/m³ (tabla 3.29) para la especie *Guadua aculeata*.

| Especie | Densidad mín. (kg/m ³) | Densidad máx. (kg/m ³) | Autor |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| <i>Guadua aculeata</i> | 370 | 920 | Zaragoza- Hernández 2015 |
| Varias | 500 | 900 | Liese 1987 y 1988 |
| <i>Guadua angustifolia</i> | 620 | 900 | Correal y Arbeláez 2010 |
| <i>Dendrocalamus asper</i> | 560 | 700 | Surjokusumo y Nugroho 1995 |
| <i>Bambusa heterostachya</i> | 390 | 580 | Mohmod. et al 1995 |
| <i>Bambusa vulgaris</i> | 690 | 840 | Valero et al. 2005 |
| <i>Bambusa blumeana</i> | 390 | 590 | Espiloy 1985 |
| <i>Chusquea culeou</i> | 550 | 690 | Poblete et al. 2009 |
| <i>Gigantochloa levis</i> | 470 | 800 | Nordahlia et al 2012. |

Tabla 3.28. Valores de densidad básica de varias especies obtenidas de la bibliografía²⁷.

Los hallazgos principales en este trabajo sobre la cuantificación de la densidad aparente y perfil de densidad por medio de TC muestran la fiabilidad de usarlo como densitometría de materiales compuestos. Los rangos de la densidad obtenidos en este trabajo están en acuerdo con los rangos de densidades de bambús realizados por otros estudios. Los resultados muestran que la variación de densidad es debido a la inhomogeneidad del material debido a la diferente densidad de las fibras en diferentes regiones y por las irregulares de los haces vasculares entrelazados. Sin embargo, en la dirección longitudinal, las partes de los entrenudos de las tres especies de bambú tienen una densidad relativamente uniforme. La variación tan amplia en la densidad puede explicarse por las características anatómicas del bambú; esto aunado a la mayor heterogeneidad que hay en individuos provenientes de bosques naturales.

CAPÍTULO 4

ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

En este capítulo se presentan diferentes planos tomográficos (figura 4.1) de la especie *Otatea acuminata*. La figura 4.1.A. muestra un corte trasversal en el plano z; 4.1.B en el plano y; 4.1.C en el plano x; y 4.1.D la reconstrucción de la imagen en 3D con cada uno de los planos. Se exhibe la orientación de las fibras, en la dirección longitudinal (figura 4.2 y figura 4.3). La orientación de las fibras a lo largo del culmo son paralelas excepto en el nudo donde cambian su orientación (figura 4.3), además se pueden distinguir las paredes exterior e interior del bambú, así como la diferencia del nudo y entrenudo. Se observó que de forma similar se obtiene el mismo comportamiento de orientación de las fibras en los otros bambúes. En la dirección radial se exponen 2 tomografías: nudo (figura 4.4) y entrenudo (figura 4.5), donde observamos la distribución y tamaño de los haces vasculares. La figura 4.6 presenta los planos z, y, x, y la reconstrucción de la imagen en 3D, de la especie *Bambusa oldhamii* y la figura 4.7 la reconstrucción de la imagen en 3D en el plano Y.

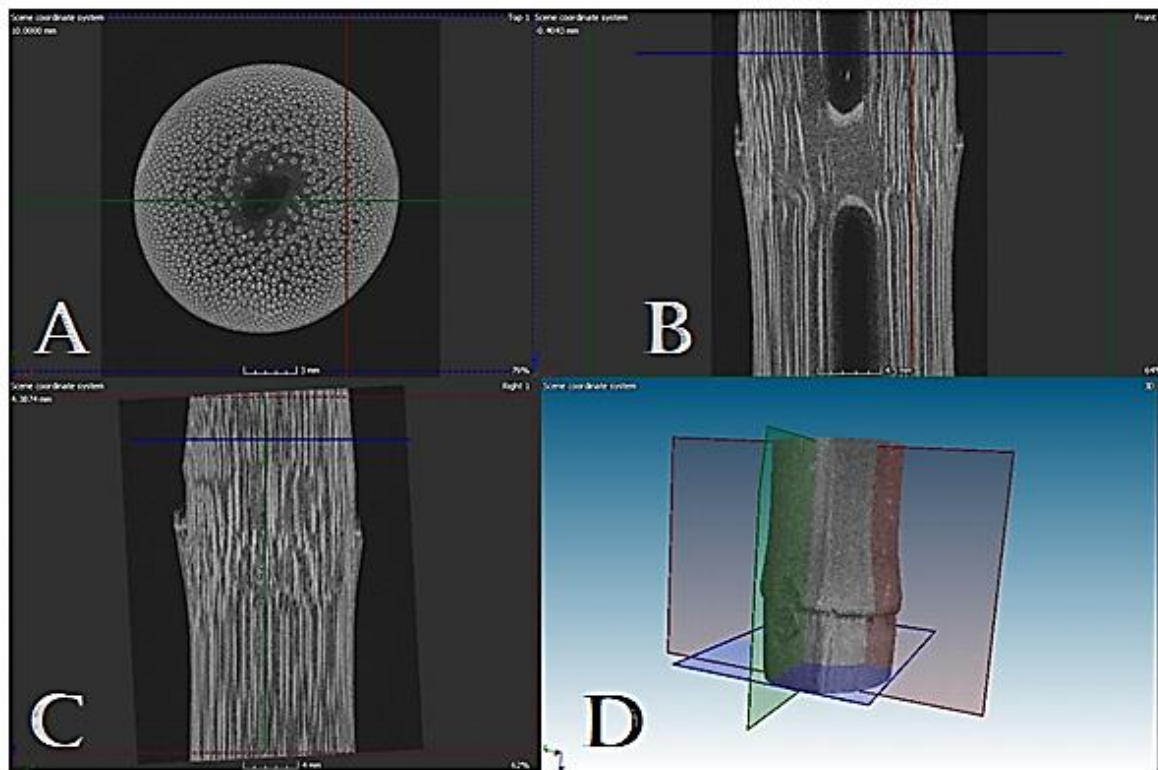


Figura 4.1. Imagen tomográfica de la especie *Otatea acuminata*. A)plano z, B)plano y, C)plano x, D) reconstrucción de la imagen en 3D y ubicación de los diferentes planos.

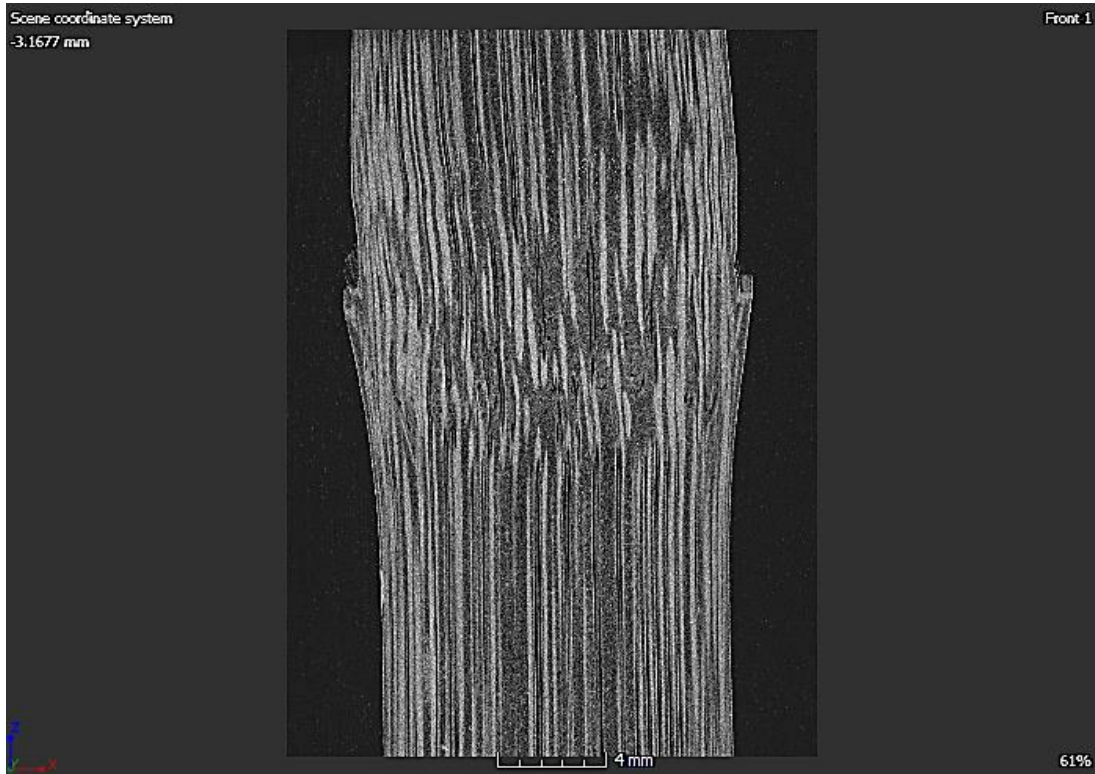


Figura 4.2. Corte transversal del culmo del bambú en la dirección longitudinal.



Figura 4.3. Corte transversal del culmo del bambú en el nudo.

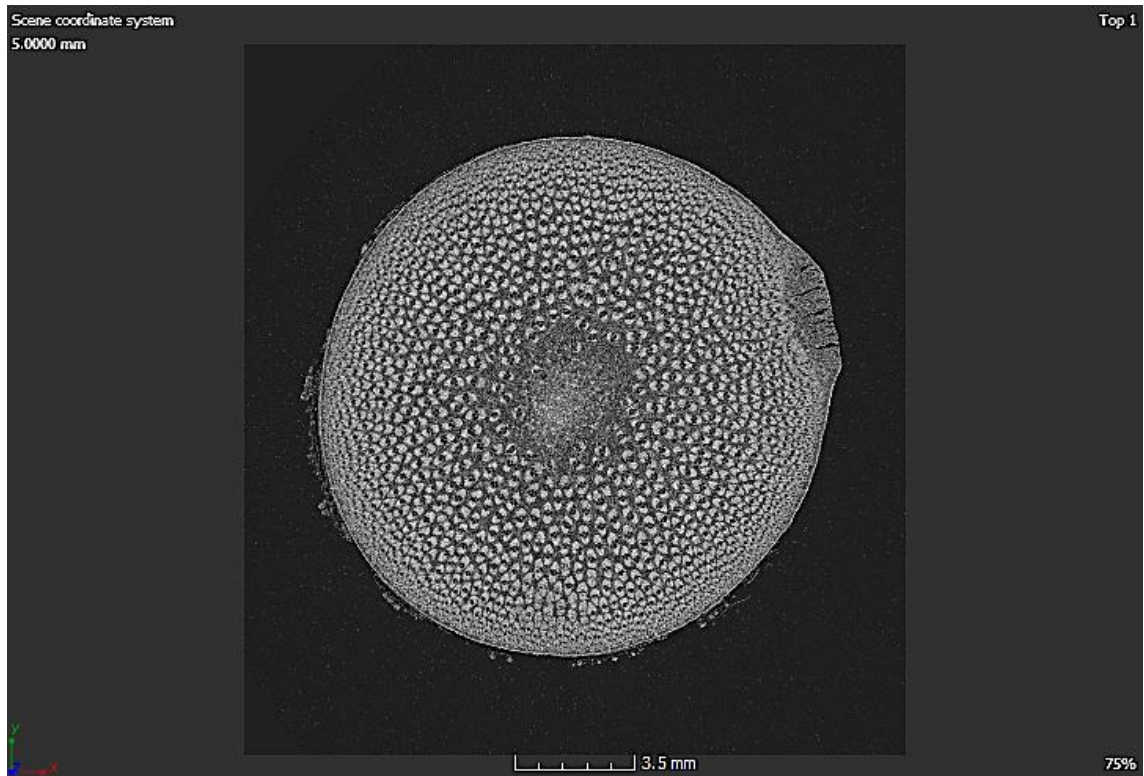


Figura 4.4. Tomografía del bambú en el nudo.

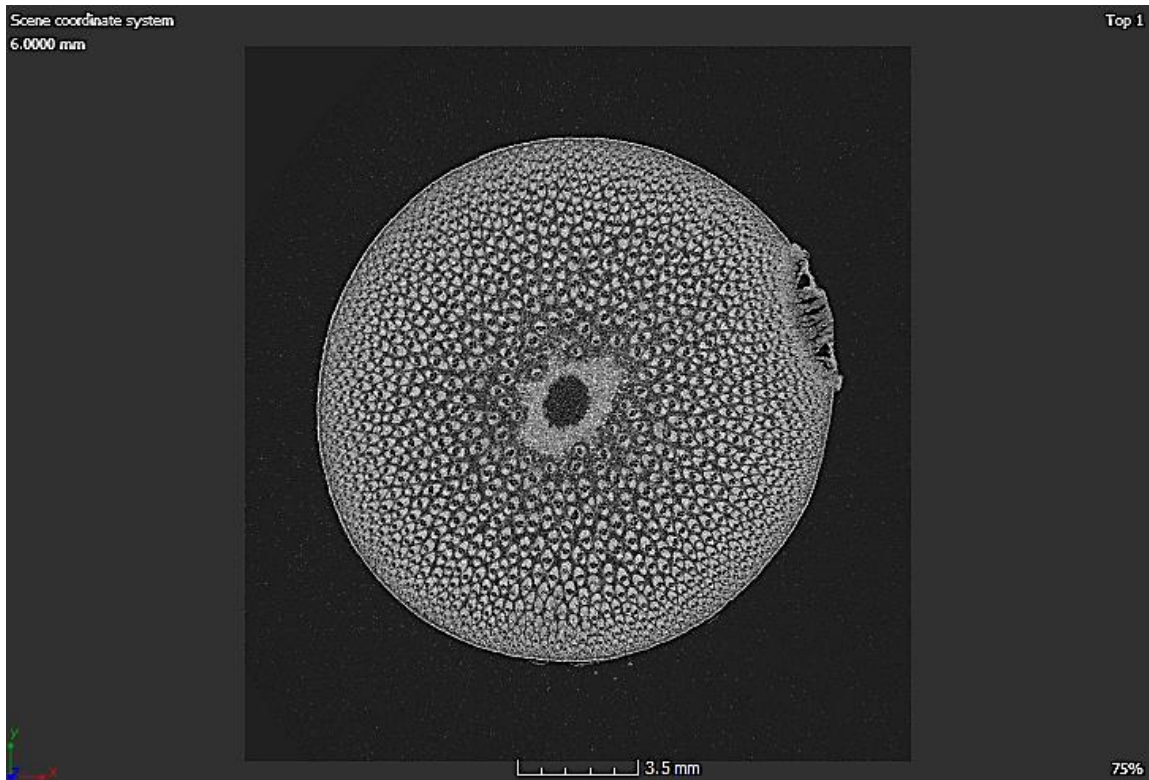


Figura 4.5. Tomografía del bambú en el entrenudo.

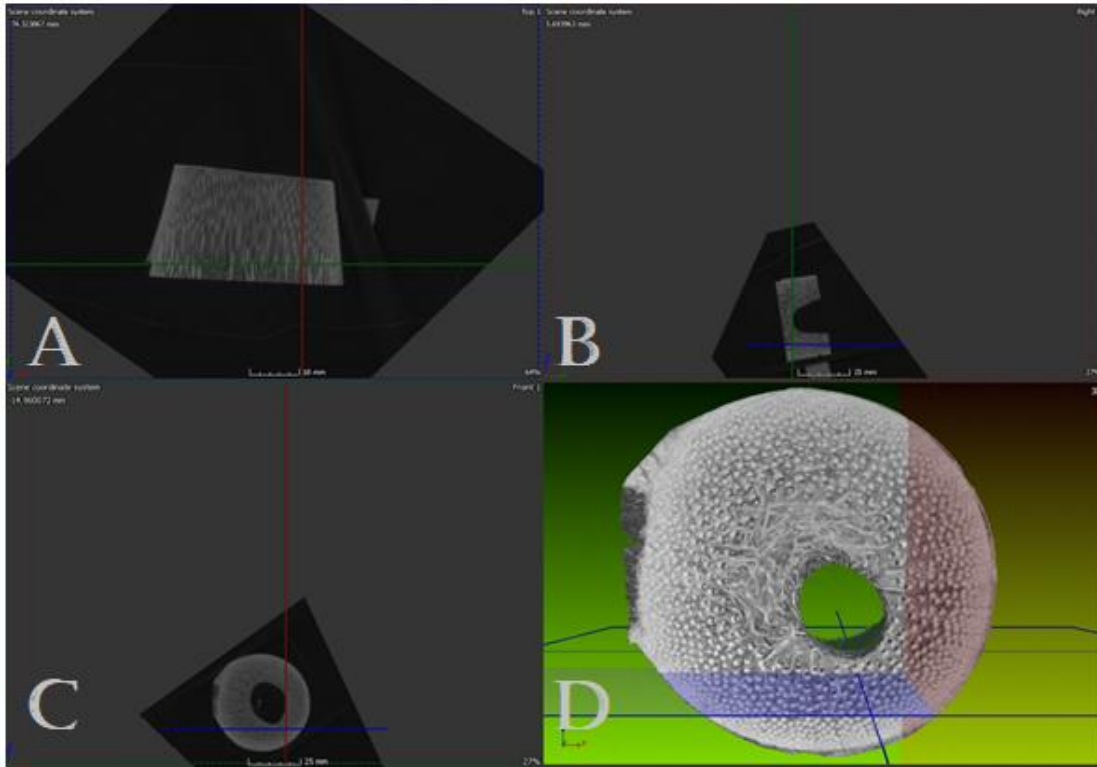


Figura 4.6. Imagen tomográfica de la especie *Bambusa oldhamii*. A)plano z, B)plano y, C)plano x, D) reconstrucción de la imagen en 3D y ubicación de los diferentes planos.

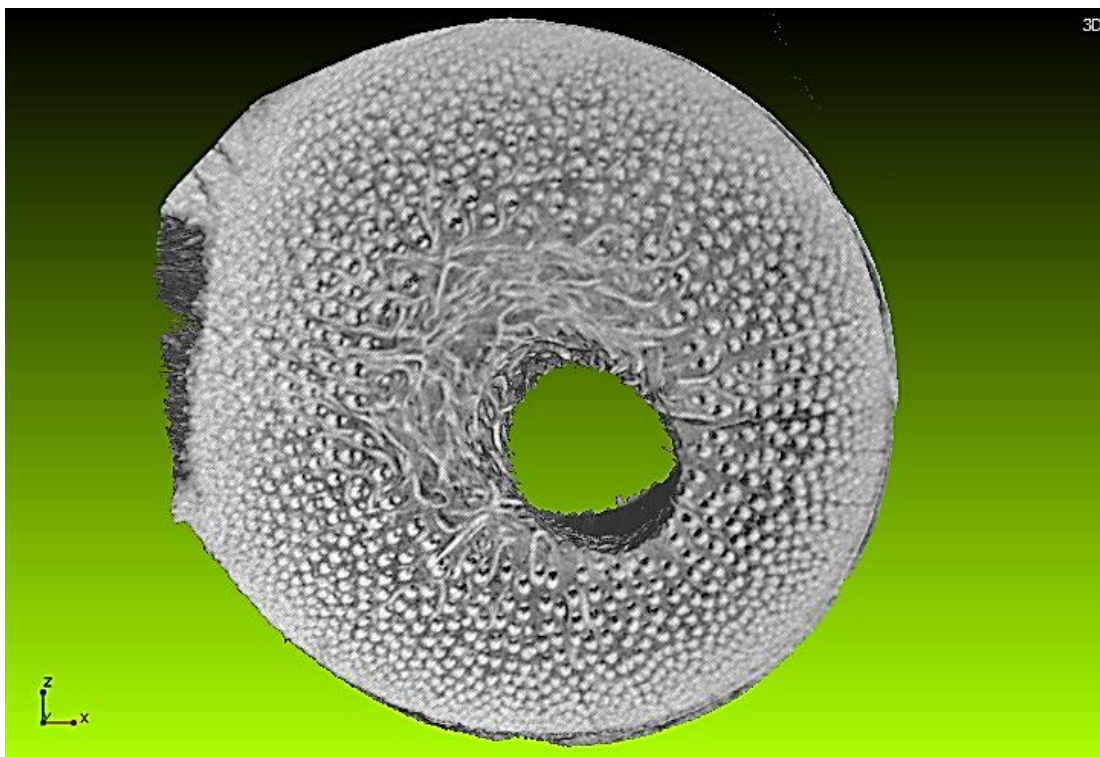


Figura 4.7. Reconstrucción de la imagen en 3D.

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se muestra que la tomografía computarizada de rayos X es una herramienta experimental no destructiva que puede servir para hacer mediciones de densidades inhomogeneas de materiales orgánicos tal como el bambú. Los resultados revelaron que la densidad del bambú se incrementó en la dirección radial (del radio interior al exterior), debido a la distribución de las fibras y haces vasculares. Se observó que cerca de la periferia (del radio exterior) los haces vasculares son más pequeños y más densos, lo que muestra una inhomogenidad de la distribución de las fibras provocando un perfil de densidad en la estructura interna del material. Además, la densidad es constante en la dirección longitudinal del culmo del bambú. En la dirección radial la densidad de las partes del entrenudo oscila entre 693.53 kg/m^3 y 851.98 kg/m^3 para la especie de *Guadua angustifolia*, *Bambusa oldhamii* se encuentra en un rango de 824.99 y 996.59 kg/m^3 , y la de *Otatea acuminata* es de 832.69 a 924.14 kg/m^3 . El rango para la especie *Bambusa oldhamii* en el nudo varía de 877.18 a 877.47 kg/m^3 . En la dirección longitudinal, el rango de densidad es de 767.87 kg/m^3 a 784.34 kg/m^3 para la especie *Guadua angustifolia*, de 865.68 kg/m^3 a 869.38 kg/m^3 para *Bambusa oldhamii* y de 860.82 kg/m^3 a 905.75 kg/m^3 para *Otatea acuminata*.

Por otro lado, las pruebas mecánicas se realizaron por una máquina universal. Uno de los pasos fundamentales que se hicieron en este trabajo de tesis fue el procedimiento relacionado con los aditamentos utilizados para el agarre de la sección transversal de las probetas, lo que condujo a asegurar, con prueba y error, una mayor adherencia entre probeta y cabezal, para que las mediciones fueran lo mas reproducibles posibles en los experimentos de tensión. Las diferencias encontradas sobre las propiedades mecánicas de cada una de las especies se pueden resumir de la siguiente manera, con mayor resistencia a la tensión fue la especie *Bambusa oldhamii*, seguido de *Otatea acuminata*, *Ocotate* y por último el *Guadua*

angustifolia. La especie con mayor resistencia a la compresión fue *Bambusa oldhamii*, seguida por *Guadua angustifolia*, *Otatea acuminata* y *Ocotate*. Los valores de módulo de Young obtenido en este trabajo son comparables con aquellos materiales convencionales utilizados para construcción.

Con ambos resultados (tomografía y pruebas mecánicas) se estableció una relación entre la densidad del material y las propiedades mecánicas (esfuerzos de tensión y compresión), donde en principio se debe tener en cuenta que a mayor densidad del material mayor deberá ser la resistencia a la tensión y compresión. Sin embargo, los resultados experimentales muestran que el módulo de Young o la resistencia del material a esfuerzos de tensión y compresión no depende solamente de la densidad aparente del material (figuras 3.66 y 3.67), lo que sugiere que las propiedades físicas de las fibras, la estructura interna y del gradiente de la densidad del bambú a lo largo de la dirección radial y longitudinal en el nudo y entrenudo son parámetros importantes que deben considerarse. Por último, los resultados sugieren que la especie *Bambusa oldhamii* y *Otatea acuminata* pueden tener una mejor aplicación en materiales de construcción dado que son aquellos que tienen la más alta resistencia a los esfuerzos de tensión y compresión comparadas con el *Guadua* y *Ocotate*.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Zaragoza-Hernandez, I., Borja de la Rosa, A., y Zamudio Sánchez F.J., Ordóñez-Candelaria V.R., Bárcenas-Pazos G.M., (2014). Bamboo culms anatomy (*Guadua aculeata* Rupr.) of the north-east region of Puebla state, Mexico. *Madera y bosques*, 20(3), 87-96.
- [2] Rios Callejas J., Esquinas Arenas G., Cerna Cortez J.R., Márquez Beltrán C., (2018). Estudio de las propiedades anatómicas de tres diferentes especies de Bambú del estado de Puebla usando Micro-Tomografía de Rayos X para aplicaciones en materiales de construcción. CT-SCAN workshop. Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas.
- [3] Huang, P., Chang, W., Ansell, M.P., Jhon Chew, Y.M., Shea A. (2015). Density distribution profile for internodes and nodes of *Phyllostachys edulis* (Moso bamboo) by computer tomography scanning. *Construction and Building Materials* 93, 197-204.
- [4] Dixon, P. G., Gibson L. J., (2018). The structure and mechanics of Moso bamboo material. *J R Soc Interface* 2014 11: 20140321.
- [5] Freyburger, Ch., Longuetaud F., Mothe F., Constant T., Leban J. (2009). Measuring wood density by means of X-ray computer tomography" *Ann. For. Sci.* 66- 804.
- [6] Mora Rodríguez L., Álvarez García E., Hernández González J.F. (2009). Determination of mechanical properties of fibers of *Bambusa Vulgaris* to use in bamboo mat board. *Ingeniería de construcción* 24(2), 153-166.
- [7] Maya Echeverry, J.M., Camargo García, J.C., Marino Mosquera, O. (2017). Characteristics of *Guadua* culms according to site and stage of maturity. *Colombia Forestal (Publicación de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal)*, 20(2), 171-180.
- [8] Moreno, L.E., Osorio L.R., Trujillo De los Ríos E.E. (2006). Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*. *Ingeniería y Desarrollo*, núm. 20, pp. 125-133. ISSN: 0122-3461.

- [9] Backeberg, N. R., Iacoviello, F., Rittner, M., Mitchell, T. M., Jones, A. P., Day, R., & Striolo, A. (2017). Quantifying the anisotropy and tortuosity of permeable pathways in clay-rich mudstones using models based on X-ray tomography. *Scientific Reports*, 7(1). doi: 10.1038/s41598-017-14810-1. Published online.
- [10] Xiong, Q., Baychev, T. G., & Jivkov, A. P. (2016). Review of pore network modelling of porous media: Experimental characterisations, network constructions and applications to reactive transport. *Journal of contaminant hydrology* (192), 101-117.
- [11] Zhang, L., Xu, N., Li, X., Wang, S., Huang, K., Harris, W. H., & Chiu, W. K. (2012). High CO₂ permeation flux enabled by highly interconnected three-dimensional ionic channels in selective CO₂ separation membranes. *Energy & Environmental Science*, 5(8), 8310-8317.
- [12] Manohar, S. (1999). *Advances in Volume Graphics*. *Computers & Graphics*, 23, 73-84.
- [13] Yan-Shuai, W., & Jian-Guo, D. (2017). *NDT&E International*, 86, 28-35.
- [14] Cedeño, V.A., Irigoyen, C.J., (2011). El bambú en México. *arqu.urb Revista electrónica de Arquitectura e Urbanismo* núm. 6. São Paulo: Universidade São Judas Tadeu. Recuperado de: http://www.usjt.br/arq.urb/numero_06/arqurb6_06_ponto_de_vista_03_alberto_cedeno.pdf
- [15] Álvarez, E.R., (2012). Comportamiento mecánico de las conexiones en los elementos de bambú para estructuras ligeras. El caso de las especies del trópico de Veracruz (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de arquitectura.
- [16] Xilema, floema. (2001). *Diccionario etimológico español en línea*. Recuperado de <http://etimologias.dechile.net>
- [17] Boundless. (s.f). *Vascular Tissue: Xylem and Phloem*. Recuperado de <http://oer2go.org/mods/en-boundless/www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/seedless-plants-25/seedless-vascular-plants-157/vascular-tissue-xylem-and-phloem-614-11834/index.html>
- [18] Nogata, F., Takahashi, H., (1995). Intelligent functionally graded material: bamboo. *Composites Engineering*, Vol. 5, No. 7, pp. 743-751.

- [19] Londoño, X., Camayo, G.C., Riaño, N.M., López, Y. (2002). Caracterización anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth. En prensa. *Bamboo, Science & culture*, vol. 16
- [20] Mannan, S., Knox, J.P., Basu, Sumit. (2016). Correlations between axial stiffness and microstructure of a species of bambú. *The Royal Society Open science*. 4: 160412
- [21] Lifton, J.J., Malcolm A.A., Mcbride, J.W., Cross, K.J. (2013). The Application of Voxel Size Correction in X-ray Computed Tomography for Dimensional Metrology. Singapore International NDT Conference & exhibition 2013. <https://pdfs.semanticscholar.org/ae79/29c9b4d89b77613bbe01d553cd2ab8619ef8.pdf?ga=2.40826082.1156364790.1572382511-920295926.1572382511>
- [22] Stock, S.R. (2009). *MicroComputed Tomography, Methodology and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742. International Standard Book Number-13: 978-1-4200-5876-5 (Hardcover).
- [23] Cervera, R.M., Blanco, D. E., (2001). *Mecánica de estructuras, libro 1, resistencia de materiales*. Barcelona, España, Editorial Edicions UPC.
- [24] Stock S. R. (2009). *MicroComputed Tomography Methodology and Applications*. CRC press, taylor and Francis Group.
- [25] Cavazos, G. J. (2016). Corrección de las gráficas de tensión y compresión. Recuperado de: <https://drive.google.com/file/d/0B78s43vDY8WJQjZYWFRyaVBIOTA/view>
- [26] Meza, J.M., Franco, E.E., Farias, M.C.M., Buiochi, E., Souza R.M., Cruz, J. (2007). Using the ultrasound and instrumented indentation techniques to measure the elastic modulus of engineering materials. *Revista de metalurgia*, 44 (1), 52-65. ISSN: 0034-8570.
- [27] Zaragoza-Hernandez, I., Borja de la Rosa, A., Zamudio Sánchez F.J., Ordóñez-Candelaria V.R., Bárcenas-Pazos G.M., (2015). Physical-mechanical properties of a mexican *Guadua* (*Guadua acueleata*). *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(3): 505-516.



BUAP

MEMORANDUM

Para: **Dr. Nicolás Rutilo Silva González, Presidente.**
Dr. José Luis Eustolio Carrillo Estrada, Secretario.
Dr. Enrique Sánchez Mora, Vocal.
Dr. César Márquez Beltrán, Vocal.

De: Dra. Lilia Meza Montes, Coordinadora del área de Ciencia de Materiales.

Asunto: Se cita al examen de grado de Maestría en Ciencias (en la especialidad de ciencia de materiales) del Ing. Edgar Rodríguez López.

Fecha: 29 de enero de 2020

Me permito informarles que el Comité Académico del IFUAP, los ha designado integrantes del Comité para el EXAMEN DE GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS (EN LA ESPECIALIDAD DE CIENCIAS DEMATERIALES) del Ing. Edgar Rodríguez López, con su tesis titulada: *"Estudio de la estructura del bambú utilizando micro-tomografía computarizada (MicroCT) de Rayos-X"*, que presentará el próximo día: Viernes 31 de enero de 2020 a las 11:00 horas en la Sala de Juntas, Edif. 1IF3.

Dra. Lilia Meza Montes
Coordinadora del área