

Determinación de propiedades mecánicas de la corteza de la palma de lata por medio de ensayos de tracción y cortante

Determination of mechanical properties of the palma de lata via tensile and shear tests

Dayal Castro¹, Iván Ortega², Ricardo Jaimes³, Manuel Martínez⁴

¹ Universidad Industrial de Santander, dayalcastro@gmail.com;

² Universidad Industrial de Santander, ivandarioortegaanillo@gmail.com;

³ Universidad Industrial de Santander, rjjaimes@saber.uis.edu.co;

⁴ Universidad Industrial de Santander, mjmartin@uis.edu.co,

Fecha de recepción: 02/26/2018 Fecha de aceptación: 09/08/2018



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4733>

Como citar: Castro, D., Ortega, I., Jaimes, R. & Martínez, M. (2018). Determinación de propiedades mecánicas de la corteza de la palma de lata por medio de ensayos de tracción y cortante. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 59-76. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4733>

Resumen

En este trabajo se muestra el proceso de caracterización mecánica de la corteza de la palma de lata (*Bactris guineensis*) a través de la realización de ensayos con base en normas ASTM. Se muestra la forma en que se extraen las probetas desde la corteza por medio de cortes longitudinales, también se describen los ensayos realizados y las propiedades obtenidas como módulos de elasticidad, módulos de cortante y coeficientes de Poisson en aras de describir el comportamiento mecánico de la palma. Los resultados obtenidos son analizados y comparados con resultados de maderas similares para finalmente derivar en conclusiones y brindar recomendaciones para futuras investigaciones. La palma de lata se ha usado principalmente como material de construcción, aplicándose en cubiertas de techos y desempeñando el papel de refuerzo para muros en las casas de zonas aledañas a los ríos en algunas regiones tropicales de Colombia; sin embargo, a pesar de las reducidas aplicaciones actuales de la palma de lata, su corteza posee propiedades interesantes que sería valioso estudiar. La simbología utilizada en este artículo es:

σ = magnitud del esfuerzo normal
 E = módulo de elasticidad
 ε = deformación unitaria
 τ = magnitud del esfuerzo cortante
 G = módulo de cortante
 γ = deformación angular unitaria
 ν = magnitud de coeficiente de Poisson
 t = magnitud en la dirección tangencial
 r = magnitud en la dirección radial
 l = magnitud en la dirección longitudinal
 tr = magnitud aplicada en t con dirección r
 lr = magnitud aplicada en l con dirección r
 lt = magnitud aplicada en l con dirección t
 $##$ = posición de la constante dentro de una matriz
 S_{ij} = matriz de flexibilidad
 C_{ij} = matriz de rigidez

Palabras clave: palma de lata, caracterización, matriz de rigidez, materiales transversalmente isótropos, esfuerzo, deformación.

Abstract

In this paper the process of characterization of the crust of the “*palma de lata*” (*Bactris guineensis*) through the realization of tests based on the ASTM regulations is shown. The method by which the samples are extracted from the crust via longitudinal slices is described, also the tests and the obtained properties like elasticity modulus, shear modulus and Poisson coefficients are defined to describe the mechanical behavior of the palm. The results are analyzed and compared with similar woods to finally derive in conclusions and give recommendations for future investigations.

The “*Palma de lata*” has been used mainly as construction material, its applications range from ceiling cover to wall reinforcement in houses nearby from rivers in some tropical zones of Colombia, however, in spite of the reduced current applications for this palm the crust possess interesting properties worth studying.

The symbols used in this article are:

σ = Magnitude of the normal stress
 E = Elasticity modulus
 ε = deformation per unit length

τ = Magnitude of shear stress

G = Shear modulus

γ = Angular deformation

ν = Poisson's ratio

t = Magnitude in the tangential direction

r = Magnitude in the radial direction

l = Magnitude in the longitudinal direction

tr = Magnitude applied in t directed to r

lr = Magnitude applied in l directed r

lt = Magnitude applied in l directed to t

= Position of a constant inside a matrix

S_{ij} = Compliance matrix

C_{ij} = Stiffness matrix

Keywords: palma de lata, characterization, stiffness matrix, transversely isotropic material, stress, strain.

1. Introducción

Las ideas ecológicas y sustentables han tenido gran impacto en el avance de la ciencia, queriendo estrechar las brechas que aún existen entre la naturaleza y la tecnología, gracias al deseo de reducir el impacto de la contaminación y disminuir la cantidad de residuos sólidos.

La palma de lata es encontrada en regiones de Suramérica [1] y se aprovecha para la obtención de bebidas con alto contenido de antioxidantes [2] y vinos, su tallo ha sido usado en refuerzos de construcciones antiguas [3], pero pocos estudios [3, 4] se han centrado en la caracterización mecánica de la lata, en consecuencia, se hizo necesario estudiar el comportamiento mecánico de esta palma y así dar los primeros pasos al diseño de elementos que aprovechen

esta materia prima que actualmente no se utiliza más allá de la construcción de estructuras improvisadas en comunidades rurales.

Al caracterizar mecánicamente propiedades de la palma de lata, se busca expandir el conocimiento acerca de este material para que pueda ser desarrollado. A pesar del potencial de la palma de lata mostrado en [4], a lo largo de la historia su uso se ha limitado a métodos de construcción que han entrado en desuso, como elemento decorativo y para elaboración de instrumentos musicales [3, 5]. Debido a esto y al crecimiento del sector agropecuario en Colombia, la palma de lata podría verse amenazada en un futuro si no se fomenta su aprovechamiento sostenible [5]. Dicho lo anterior, con este estudio se pretendió indagar el comportamiento mecánico



Figura 1. Palma de lata en su lugar de origen [3].

de la palma de lata para así junto con [4] sentar las bases para la futura utilización de la lata en la creación de nuevos materiales compuestos (Figura 1).

En este artículo se expone el comportamiento mecánico de la palma de lata. Por medio de ensayos de tracción y de cortante basados en las normas ASTM D3039 [6], D1037 [7], E132 [8], D7078 [9], fueron halladas las propiedades mecánicas necesarias para definir la matriz de elasticidad de la palma, propiedades como módulos de elasticidad, coeficientes de Poisson y módulos de cortante fueron medidas y comparadas con maderas comunes y con el compuesto fibra de vidrio-epoxi.

2. Palma de lata

2.1 Características generales

La palma de lata se caracteriza por presentar tamaños de tallos entre 2.5 y 4 cm de diámetro y alturas de entre 3 y 8 m [3]. Las propiedades mecánicas más



Figura 2. Sección transversal del tallo de palma de lata. Izquierda: Corte transversal de la palma. Derecha: Dimensiones importantes.

Fuente: Elaboración propia.

adecuadas son encontradas en la parte externa del tallo y de un color oscuro [4] como se muestra en la Figura 2. El espesor depende de la edad de la palma y puede llegar hasta los 3 mm.

Para la construcción de las probetas, es necesario obtener el material en forma de laminillas, las cuales se consiguen de la zona oscura del tallo anteriormente descrita, por lo tanto, su geometría estará limitada por las dimensiones del tallo. En la Figura 2 se muestra las medidas principales del tallo y de las laminillas: D_t es el diámetro externo del tallo, e_t es el espesor

de la región de fibras resistentes, a_l es el ancho de la laminilla y e_l es el espesor de laminilla. Al trabajar con la palma se encontró que el espesor máximo obtenido es de 2 mm y el ancho máximo es de 2 cm, observándose que ambos no pueden estar presentes en la misma laminilla.

2.2 Anisotropía de la palma de lata

Los materiales ortótropos son una clase especial de materiales anisótropos en los cuales se encuentran tres planos de simetría, haciendo que se encuentren diferencias en las propiedades en las direcciones de un sistema de coordenadas ortogonal, normalmente para las maderas comunes y en este caso también para la palma. Estas direcciones están definidas por los ejes longitudinal,

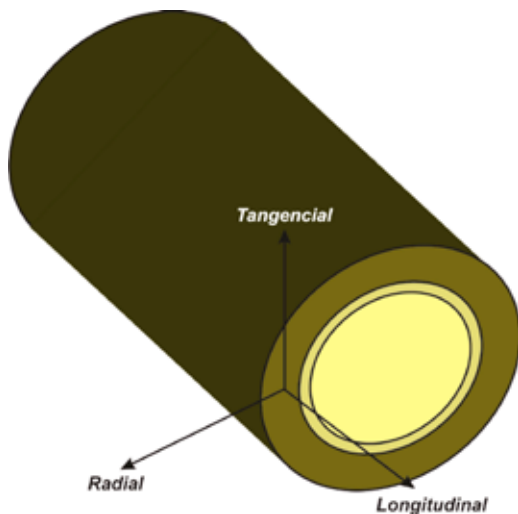


Figura 3. Direcciones principales de las fibras de la palma.

Fuente: Elaboración propia.

tangencial y radial que se definen a su vez por las capas de crecimiento del tallo [10, 11], como se muestra en la Figura 3.

Para definir la matriz de elasticidad de un material anisótropo, es necesario conocer las 36 constantes que permiten definir la ley de Hooke tridimensional. En el caso de los materiales ortótropos, debido a la simetría anteriormente mencionada, se reducen a 12 las constantes necesarias para definir el problema elástico.

La ecuación 1 es la forma tensorial de la ley de Hooke, en la cual el término σ_{ij} representa el tensor de esfuerzos, ϵ_{kl} representa el tensor de deformaciones y C_{ijkl} es el tensor de rigidez del material.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \tag{1}$$

La forma tensorial de la ley de Hooke también puede escribirse en términos del tensor de flexibilidad, como se observa en la ecuación 2, de modo que este es el inverso del tensor de rigidez. Ahora, tal como se denota en [12] para los materiales ortótropos, se puede representar matricialmente como se visualiza en la ecuación 3, de manera que las componentes de los esfuerzos serán los esfuerzos normales σ_L , σ_T y σ_R en las direcciones principales y los esfuerzos cortantes τ_{LT} , τ_{TR} y τ_{LR} . Así mismo se advierte que las deformaciones incluyen tanto las que se presentan paralelas a las direcciones principales, por ejemplo ϵ_L , ϵ_T y ϵ_R , como las deformaciones angulares γ_{LT} , γ_{TR} y γ_{LR} .

$$\epsilon_{kl} = S_{ijkl} \sigma_{ij} \tag{2}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Para el caso de la matriz de elasticidad, las constantes de la diagonal principal son los inversos de los módulos de elasticidad y módulos de cortante del material y los términos restantes son los negativos de los coeficientes de Poisson divididos por los módulos de elasticidad correspondientes.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_R \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Únicamente 9 de estas 12 constantes son independientes, debido a que la matriz de flexibilidad es simétrica respecto de su diagonal principal obteniendo $S_{12} = S_{21}$, $S_{13} = S_{31}$ y $S_{23} = S_{32}$.

En la Figura 4 de [4] se distingue la similitud entre la estructura de la palma de lata y la de los compuestos de fibra de vidrio encontrada en [13], por ello se espera que la palma de lata puede presentar un eje de simetría que suele encontrarse en los compuestos, lo cual se denomina isotropía transversal. En este caso esto indicaría que para la palma de lata las propiedades en las direcciones radial y tangencial son iguales.

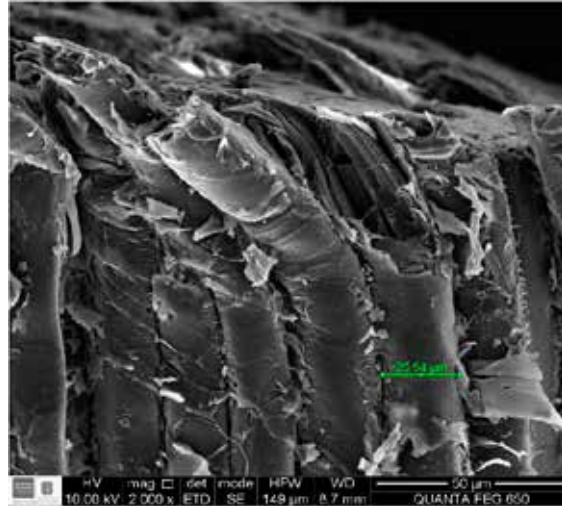


Figura 4. Fotografía MEB de palma de lata [4].

Para un material con isotropía transversal son necesarias las constantes S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{23} , S_{66} de modo que la ecuación 4 podría reescribirse como se muestra en la ecuación 5.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & -\frac{\nu_{RT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Además se cumple la dependencia del cuarto término de la diagonal principal, tal que:

$$S_{44} = 2 * (S_{22} - S_{23}) \quad (6)$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$G_{RT} = \frac{E_T}{2 * (1 + \nu_{RT})} \quad (7)$$

Finalmente, para definir totalmente las propiedades elásticas de la palma, se necesitará encontrar los módulos elásticos E_L y E_{TR} , el coeficiente de Poisson ν_{LT} , el módulo de cortante G_{LT} y alguna de las propiedades en el plano TR , ya el coeficiente de Poisson ν_{TR} , ya el módulo de cortante G_{TR} .

3. Método

Se utiliza como guía la norma [6] para materiales compuestos entendiendo que la madera es un material compuesto conformado por fibras de celulosa y una matriz de hemicelulosa y lignina [14, 15].

Adicionalmente, teniendo en cuenta la norma [7], se realizaron las pruebas de tracción para obtener los módulos de Young en las tres direcciones principales. El ensayo en la dirección radial se hace con el fin de verificar la ortotropía de la palma.



Figura 5. Montaje para pruebas en dirección longitudinal: (a) Probeta, (b) Medición por extensómetro láser, (c) Extensómetro, (d) Mordazas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

Para los ensayos se utilizó una máquina MTS Bionix Tabletop Modelo 370.02 con una celda de carga con capacidad de 25 kN y un desplazamiento de ± 57 [mm].

Para las pruebas se utilizaron tres tallos de palma de lata diferentes elegidos aleatoriamente debido a que la única manera actual de encontrar la palma es en estado salvaje sin ningún tipo de control en su desarrollo.

En la Figura 5 se muestra una probeta utilizada en los ensayos de tracción longitudinales. Para este ensayo se usaron tres probetas de geometrías similares las cuales no se llevaron hasta la ruptura total, aun así, se apreció ruptura de algunas fibras. Con este ensayo se pudo determinar el módulo de elasticidad del material y los límites de esfuerzo y deformación del material. Conjuntamente, se determinó el módulo de Poisson con base a la norma de materiales compuestos [8] por medio de las mediciones de los extensómetros mostrados en la Figura 5.

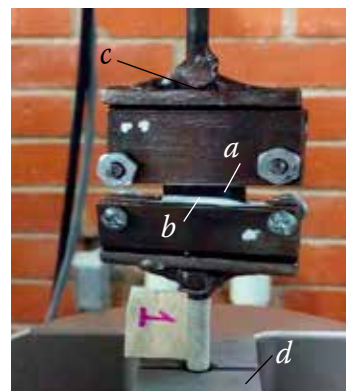


Figura 6. Montaje para pruebas en dirección tangencial: Probeta, (b) Adhesivo epóxico, (c) Sujeciones de la probeta, (d) Mordazas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

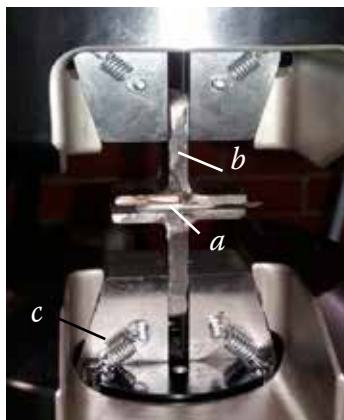


Figura 7. Montaje para pruebas en dirección radial: (a) Probeta y adhesivo epóxico, (b) sujeciones de la probeta, (c) Mordazas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

Para las pruebas de tracción de las direcciones restantes cuyos montajes se observan en la Figuras 6 y 7, se hizo necesario diseñar elementos adicionales para sostener las laminillas a la máquina, además se incluyó un adhesivo epóxico de alta resistencia y rigidez para unir la palma a los artefactos de sujeción.

El ensayo mostrado en la Figura 6 fue realizado para determinar las propiedades en dirección tangencial, por ello se observa que la laminilla de palma fue ubicada con las fibras perpendiculares al eje de carga y la dirección tangencial mostrada en la Figura 3 coincide con la dirección de la carga.

Para el ensayo radial mostrado en la Figura 7, igual que en el ensayo tangencial, las fibras están perpendiculares a la carga, pero en este ensayo la dirección coincidente con la carga es la dirección radial de la palma, mostrada en la Figura 3.

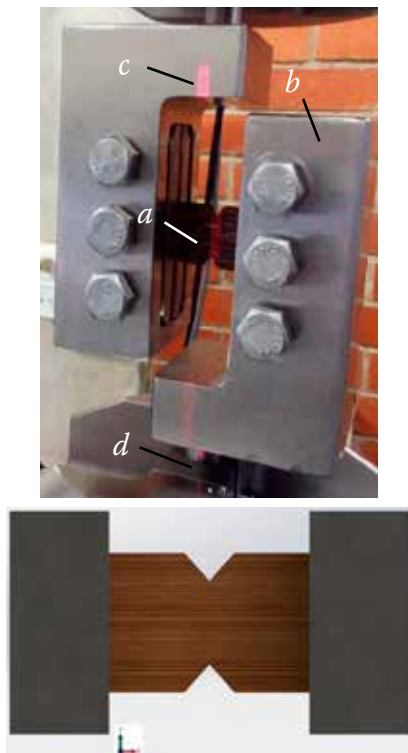


Figura 8. Montaje para pruebas de cortante LT: (a) Probeta, (b) Sujeciones de la probeta, (c) Láser para alineación de ejes y entallas, (d) Mordazas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizaron también pruebas para determinar las propiedades de cortante de la palma guiados por la norma [9]. De nuevo, debido a las reducidas dimensiones de las probetas de palma, se hace necesario disminuir la escala de estas respecto de las sugeridas por la norma.

Tal como se muestra en la Figura 8, en el ensayo para determinar las propiedades de cortante en dirección LT, fue necesario realizar las probetas de tal modo que el eje formado por las entalladuras coincidiera con la dirección de la carga, de modo que esta es perpendicular a la dirección de las fibras. En contraste

a esto, en la Figura 9 se observa que en el ensayo para la prueba de cortante TL tanto el eje de las entalladuras como la dirección de la carga y las fibras son paralelas.

Para poder realizar estos ensayos fue necesario adicionar a la máquina un par de suplementos ubicados en ambas mordazas, tal como se aprecia en la Figura 8. Se hicieron en total seis pruebas de cortante, de las cuales tres fueron hechas tratando de cortar la fibra de la palma de forma perpendicular y las otras tres haciendo el corte paralelo a las fibras, con el fin de determinar los coeficientes G_{LT} y G_{TL} , respectivamente. Adicionalmente se utilizó el láser con el fin de alinear los ejes de la máquina con las entallas de las probetas.

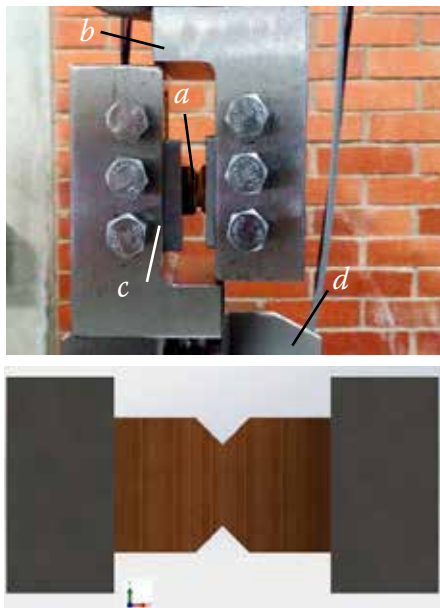


Figura 9. Montaje para pruebas de cortante TL: (a) Probeta, (b) Sujeciones de la probeta, (c) Platinas para adaptación, (d) Mordazas de la máquina.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 9, para determinar el módulo de cortante TL se genera una entalla de tal forma que las fibras queden paralelas al eje de acción de la fuerza, para ello, y debido a que el máximo ancho que se puede obtener de las láminas de corteza de palma es de 2 cm, se hace necesario adicionar al montaje cuatro platinas (dos para cada lado) que permitan ajustar la probeta.

Debido a que en la prueba se miden los desplazamientos que se dan a lo largo del eje de aplicación de la fuerza, se hace necesario transformar dichos desplazamientos para obtener las deformaciones angulares. Para ello se relacionan los parámetros con la ecuación 8, de modo que D_h son los desplazamientos medidos en la prueba, L la longitud libre de la probeta y γ el ángulo de deformación, tal y como se muestra en la Figura 10.

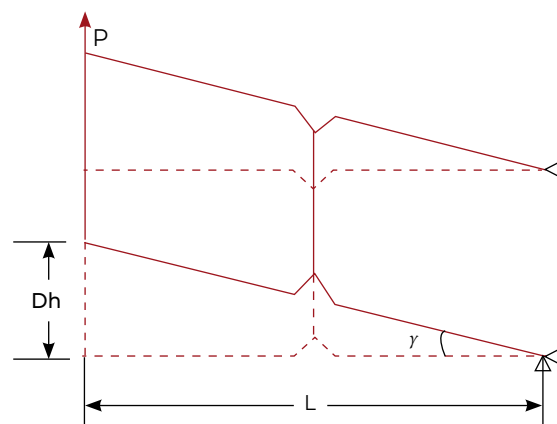


Figura 10. Geometría de las probetas de cortante.

Fuente: Elaboración propia.

$$\tan(\gamma) = D_n/L \quad (8)$$

Para ángulos pequeños $\tan(\gamma) \cong \gamma$, por lo cual la ecuación 8 quedaría:

$$\gamma = D_n/L \quad (9)$$

4. Resultados

4.1 Tracción longitudinal

La Figura 11 muestra le esfuerzo-deformación para la probeta longitudinal de las tres pruebas realizadas. En primera medida se observa que en la zona de inicio entre valores de esfuerzo de 6 y 11 MPa se presenta una zona con una pendiente pronunciada, seguido de esto se advierte la reducción de la pendiente. Según trabajos anteriores [4] se ha podido distinguir que esta reducción de pendiente es causa del rompimiento de la primera fibra, y se presume que esta fibra pertenece a la región externa del tallo, debido a que en esta zona la palma presenta mayor dureza y fibras de menor tamaño.

Las tres curvas nombradas como L1, L2 y L3 representan probetas obtenidas de diferentes tallos de palma, de las cuales también fueron obtenidas las probetas para los ensayos en las direcciones restantes.

El módulo de elasticidad promedio entre las tres pruebas para la zona de alta rigidez es de 13.15 GPa. Se observa una diferencia notable respecto del trabajo de Chávez, García y Pertuz [4] que puede deberse al uso de tallos de palmas más jóvenes y con menor porcentaje de

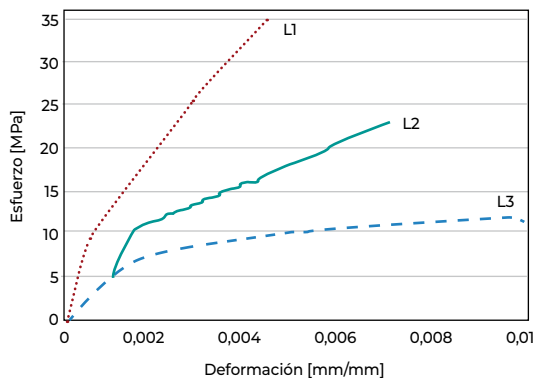


Figura 11. Esfuerzo-deformación de las probetas en dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia.

fibras de alta dureza. Se denota también que el espécimen nombrado como L1 posee módulo de elasticidad similares a [4]. Se marca una clara diferencia en el esfuerzo de cambio de pendiente respecto de los ensayos mencionados, de modo que este esfuerzo promediado entre las tres probetas de 8.18 MPa es para una deformación de 9.22×10^{-4} mm/mm, a diferencia de los 140 MPa con 9×10^{-4} mm/mm encontrados por [4], esto evidencia nuevamente la diferencia de pendientes de los ensayos.

4.2 Tracción radial

La Figura 12 muestra el esfuerzo-deformación para las probetas en dirección radial de las tres pruebas realizadas nombradas como R1, R2 y R3. Se encontró que el valor módulo de elasticidad promedio es de 0.121 GPa, con esto se evidencia una clara diferencia entre el módulo en dirección longitudinal y radial, de modo que es cerca de 110 órdenes de magnitud menor entre las

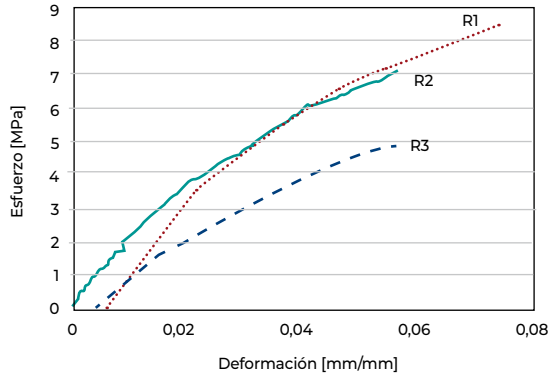


Figura 12. Esfuerzo-deformación de las probetas en dirección radial.

Fuente: Elaboración propia.

dos direcciones. Se presume que el valor obtenido puede incluir errores debidos a la dificultad de realizar la unión entre la probeta de palma y el dispositivo de fijación.

Puesto que en este ensayo y en el realizado en la dirección tangencial se pretende realizar una separación biológica de la matriz de la palma, se espera que para ambos ensayos los esfuerzos hallados sean de valor similar. A pesar de eso, como se muestra en la sección 4.3, se encontró una gran diferencia en los resultados de los dos ensayos. En esta prueba se aprecia también que el esfuerzo promedio máximo en la dirección radial es de 6.84 MPa con una deformación de 0.062 mm/mm.

4.3 Tracción tangencial

La Figura 13 muestra el esfuerzo-deformación para las probetas en dirección tangencial, para las tres pruebas realizadas diferenciadas por T1, T2 y T3.

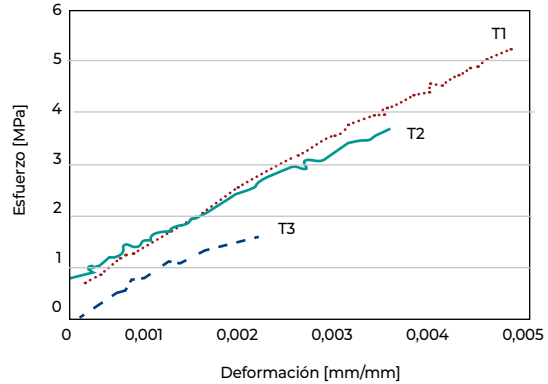


Figura 13. Esfuerzo-deformación de las probetas en dirección tangencial.

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de elasticidad en esta dirección es de 0.832 GPa, de modo que este es 15.8 veces más pequeño que el módulo en la dirección tangencial. Se observa que los resultados obtenidos para esta dirección difieren respecto del módulo de elasticidad radial de modo que es 6.88 veces mayor. Debido a esto no se podría decir que la palma de lata presenta isotropía transversal, a pesar de lo cual se debe tener en cuenta que el método de prueba de la dirección radial presenta errores no evidenciados en los ensayos tangenciales, de tal manera que se asume que el módulo en dirección tangencial rige el comportamiento de la matriz natural de la palma de lata.

4.4 Coeficiente de Poisson

Se realiza un ensayo de Poisson según la norma ASTM E132 utilizando un extensómetro convencional MTS para medir la deformación longitudinal y un extensómetro láser MTS para obtener la deformación tangencial. Únicamente

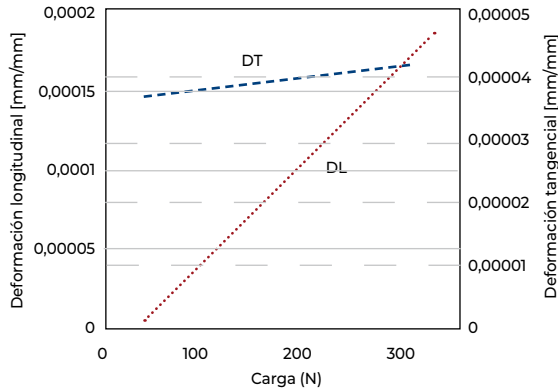


Figura 14. Deformaciones longitudinales y tangenciales variando respecto de la aplicación de la carga.

Fuente: Elaboración propia.

se pudo realizar la prueba para hallar el valor del módulo de Poisson longitudinal-tangencial con carga longitudinal debido a que el limitado espesor de las láminas impide medir las deformaciones en dirección radial.

La ecuación 10 relaciona las pendientes de las curvas deformación longitudinal-carga y deformación tangencial-carga que determinan el módulo de Poisson. Estas se grafican en la Figura 14 en la cual DT es el desplazamiento en dirección tangencial y DL en dirección longitudinal.

$$v_{LT} = \frac{\frac{d\epsilon_t}{dP}}{\frac{d\epsilon_l}{dP}} \tag{10}$$

El valor obtenido del módulo de Poisson es de aproximadamente 0.35, el cual es comparable con los valores encontrados en [16]. Este valor está dentro del rango para Poisson que se observa en [17], de modo que es mayor que cero y cumple que:

$$v_{LT} < \sqrt{\frac{E_t}{E_l}} = 3.98 \tag{11}$$

El coeficiente de Poisson restante v_{TR} es obtenido con el módulo de cortante en la misma dirección y el módulo de elasticidad en dirección tangencial como se observa más adelante.

4.5 Módulos de cortante

Como se muestra en la Figura 15, el ensayo de corte perpendicular a las fibras presenta un comportamiento similar a la referencia que se muestra en la norma ASTM D7078. Se observa que la probeta que presenta una mayor rigidez torsional, Glt1, es también la que presentó mayores valores en el módulo de elasticidad. Los valores del módulo de corte para Glt1, Glt2 y Glt3 hallados fueron de 0.477 GPa, 0.303 GPa y 0.212 GPa, respectivamente, con lo que se obtiene un módulo promedio de 0.331 GPa. También se observa una similitud entre los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad y el módulo de cortante.

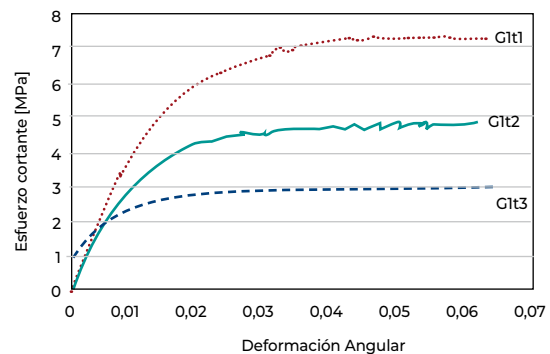


Figura 15. Gráfica Esfuerzo Cortante-Deformación angular Perpendicular a la fibra.

Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio para las tres pruebas en el que los esfuerzos empiezan a hacerse constantes es de 4.79 MPa que corresponde a una deformación angular promedio de 0.024. Se presentan la falla en dirección paralela a la fibra de la palma a pesar de que la carga sea aplicada perpendicular. Esto puede deberse a la simetría que presenta el esfuerzo cortante que, al ser cargado un esfuerzo de corte perpendicular a las fibras, se tiende a presentar un deslizamiento que induce un corte longitudinal.

La Figura 16 muestra las pruebas de cortante de la matriz de la palma de lata, de las probetas Gtl1, Gtl2 y Gtl3. Nuevamente se visualiza que la probeta número 1 muestra una pendiente mayor, y se remarca la semejanza que hay entre los módulos elásticos de los primeros dos especímenes.

Los módulos de cortante obtenidos para las tres probetas son de 0.531 GPa, 0.445 GPa y 0.234 GPa, con lo que se obtiene un cortante promedio de 0.403 GPa. El esfuerzo de ruptura promedio

encontrado es de 4.91 MPa que se encuentra para una deformación de 0.02554 mm/mm.

Se observa que los módulos de cortante LT y TL son muy similares tal como lo predice la simetría de la matriz de rigidez. La diferencia de estos módulos es de 0.072 GPa de modo que es mayor el G_{TL} que el G_{LT} .

4.6 Propiedades obtenidas

Nuevamente, debido a la geometría reducida del tallo de la palma, no es posible obtener experimentalmente las propiedades de módulo de cortante y coeficiente de Poisson en la dirección RT, que corresponde a la matriz del material. Para tener una estimación de las propiedades restantes, se formula la comparación con los resultados obtenidos por Huang et al. [18], que realizaron la caracterización de bambú de fibras paralelas (PSB, por sus siglas en inglés).

De las propiedades encontradas por [18] para el PSB, se tiene que el módulo elástico E_T es de 3.066 GPa y el módulo de corte G_{RT} es de 746 GPa. Utilizando la ecuación 7 se obtiene un coeficiente de Poisson ν_{RT} de 1.055, valor con el que se plantea una relación de semejanza entre los coeficientes de Poisson del PSB y la palma lata, tal que:

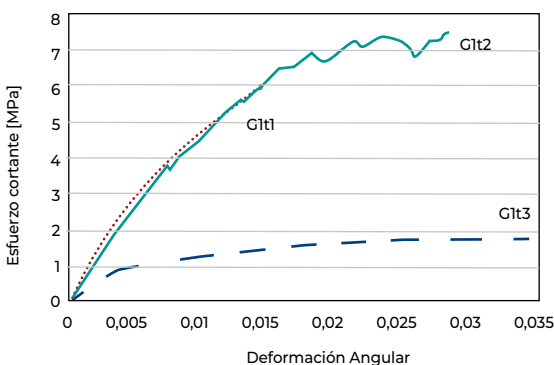


Figura 16. Esfuerzo cortante-deformación angular paralelo a la fibra.

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{\nu_{RT,PSB}}{\nu_{LT,PSB}} = R = \frac{\nu_{RT,palma}}{\nu_{LT,palma}} \tag{12}$$

Donde:

R: es la relación entre los coeficientes de Poisson. Como el ν_{LT} para el PSB es de 0.31, entonces se tiene que la relación entre los coeficientes es de 3.403. Al mantener esta relación contante para la palma de lata, se obtiene un coeficiente de Poisson ν_{RT} de 1.191. Debido a que este valor no puede darse, entonces se decide tener en cuenta los coeficientes de variación obtenidos por [18], que para el módulo elástico en dirección perpendicular a las fibras es de $\pm 28\%$ y para el módulo de cortante RT es de $\pm 14\%$, representando desviaciones estándar de 858.5 MPa y 104.4 MPa, respectivamente.

Para los diferentes límites superior e inferior, se hace el cálculo del coeficiente de Poisson para el bambú y la palma con el procedimiento descrito anteriormente. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Se observa que la variación del coeficiente de Poisson RT para el PSB variaría entre 0.2979 hasta 2.059, haciendo variar

el Poisson de la palma de lata entre 0.3363 y 2.324.

En aras de obtener un valor razonable del Poisson y con ello un módulo de cortante con una buena estimación, se observan los valores comunes para las maderas duras [11] que se muestran en la Tabla 2. De ahí se concluye que la media del coeficiente de Poisson RT es de 0.654 ± 0.113 , es decir, entre 0.767 y 0.541, a pesar de esto se observa también que hay maderas como el tilo y el álamo de Virginia que sobrepasan el límite superior de desviación estándar y ninguno de ellos es menor que el límite inferior.

Se aprecia que de la Tabla 1 solo los cálculos números 3, 4, 6 y 9 son posibles. Aun así, se observa que el cálculo 9 con los límites inferiores de PSB indica un comportamiento que se presume más acorde con lo que se encuentra comúnmente en las maderas, teniendo entonces con esto un ν_{RT} de la palma de lata de 0.8134 y con esto un módulo de cortante G_{RT} de 0.23 GPa.

Tabla 1. Cálculo de coeficientes de Poisson y módulos de cortante RT de la palma de lata por medio de los valores del PSB incluyendo las desviaciones estándar

No.	$G_{RT, PSB}$ MPa	$E_{T, PSB}$ MPa	$\nu_{RT, PSB}$	$\nu_{RT, Palma}$	$G_{RT, Palma}$ MPa
	De [18]	De [18]	Ec (7)	Ec (12)	Ec (7)
1	746	3066	1.055	1.191	189.9
2	746	3,066 + 858.5	1.63	1.841	146.4
3	746	3,066 - 858.5	0.4796	0.5415	269.9
4	746 + 104.4	3,066	0.8026	0.9062	218.2
5	746 + 104.4	3,066 + 858.5	1.307	1.476	168
6	746 + 104.4	3,066 - 858.5	0.2979	0.3363	311.3
7	746 - 104.4	3,066	1.389	1.569	161.9
8	746 - 104.4	3,066 + 858.5	2.059	2.324	125.1
9	746 - 104.4	3,066 - 858.5	0.7204	0.8134	229.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Relaciones de Poisson de maderas duras comunes [11]

Especie	ν_{LT}	ν_{RT}
Fresno blanco	0.44	0.684
Balso	0.488	0.665
Tilo	0.406	0.912
Abedul amarillo	0.451	0.697
Cerezo negro	0.428	0.695
Álamo de Virginia	0.42	0.875
Caoba africana	0.641	0.604
Arce	0.424	0.774
Roble rojo	0.35	0.56
Roble blanco	0.369	0.618
Nogal negro	0.632	0.718
Álamo amarillo	0.392	0.703
Media	0.419 ± 0.096	0.654 ± 0.113

Finalmente el comportamiento mecánico de la palma de lata puede ser descrito con las constantes ingenieriles obtenidas experimentalmente o calculadas por similitud con el PSB. Estas propiedades se muestran en la Tabla 3 junto con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 3. Medias y coeficientes de variación de las propiedades encontradas en la palma de lata

Propiedad	Media	CV %
E_L GPa	13.15	65.7
E_T GPa	0.832	20.3
G_{LT} GPa	0.331	40.7
G_{RT} GPa	0.23	—
ν_{LT}	0.35	—
ν_{RT}	0.813	—
$\sigma_{Prop,L}$ MPa	8.18	28.4
$\epsilon_{Prop,L}$ mm/mm	$9.22e-4$	55.9
$\sigma_{Max,T}$ MPa	3.55	49.9
$\epsilon_{Max,T}$ mm/mm	$3.46e-3$	38.9
$\epsilon_{Max,LT}$ MPa	4.77	39
$\gamma_{Max,LT}$	0.028	4.9

Fuente: Elaboración propia.

En donde el coeficiente de variación se refiere al valor porcentual del cociente entre la desviación estándar y el valor absoluto de la propiedad encontrada.

Las variaciones encontradas se deben principalmente a que las probetas fueron obtenidas con métodos convencionales y de tres palmas distintas. Se observa en [4, 19] que las propiedades en dirección longitudinal tanto de la palma como del bambú varían significativamente según la cantidad de fibras de alta dureza. Aun así, esta variación se disminuye para el módulo elástico en dirección perpendicular a las fibras, como se observa en el 20.3% de variación respecto del 65.7% que presenta el módulo elástico longitudinal. En cambio, la cantidad de fibras duras afecta de forma significativa el esfuerzo máximo encontrado en la dirección tangencial y no tanto así para el esfuerzo límite proporcional en dirección longitudinal ($\sigma_{Prop,L}$).

Se advierte que las deformaciones en dirección longitudinal también se ven afectadas, lo que se atribuye nuevamente a la cantidad de fibras duras en las cortezas ensayadas, de modo que a menor cantidad el material tiende a ser más flexible pero menos resistente, lo que se evidencia en los módulos elásticos. A diferencia de esto, una mayor similitud en los módulos elásticos transversales indica que las desviaciones en las deformaciones máximas son producto de la variación de los esfuerzos máximos.

El módulo de cortante LT encontrado tiene una variación significativa, del

40.7%. Y debido a que las deformaciones angulares máximas tienen poca dispersión (solo del 4.9%), la variación del módulo recae en la propia variación del esfuerzo cortante máximo encontrado que equivale al 39%.

4.7 Comparación

En la Tabla 4 se muestran las propiedades que definen la matriz de elasticidad tanto de la palma como de otras maderas comunes como el PSB [18], el roble blanco [11] y el álamo amarillo [11].

Se aprecia que la palma de lata posee un módulo de elasticidad longitudinal más alto respecto de las otras maderas mostradas. El módulo de elasticidad transversal es significativamente menor respecto del PSB, esto puede deberse a que el PSB tiene un aglomerante adicional que aporta mayor rigidez perpendicular a las fibras. En cambio,

la palma y el roble muestran gran similitud en el E_T y el álamo amarillo tiene un módulo menor.

El módulo de cortante LT tiene valor mucho menor que los de las otras maderas mostradas. Aun así, el módulo de cortante RT es mayor que el del álamo amarillo.

Los coeficientes de Poisson muestran que en ambas direcciones LT y RT se aproximan a los coeficientes de las otras maderas y se presume son adecuados para describir el comportamiento de la palma de lata.

5. Conclusiones

Para la palma de lata se encontró que los módulos de elasticidad tienen valores de $13.15 \text{ GPa} \pm 8.64$ y $0.832 \text{ GPa} \pm 0.168$ en dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

Los módulos de cortante en la palma de lata son de $0.331 \text{ GPa} \pm 0.134$ y 0.23 GPa (estimado) para las direcciones LT y RT, respectivamente. El primero hallado experimentalmente y el segundo por semejanza con el compuesto de bambú PSB. Se considera que estos módulos, especialmente el LT, tienen un valor reducido debido a la poca rigidez torsional que tiene la matriz de la palma.

Para los coeficientes de Poisson se encontraron valores de 0.35 el LT y 0.813 el RT. Nuevamente el primero se halló por experimentación y el segundo por semejanza con el PSB. Se espera que estos coeficientes aproximen el comportamiento de la palma suficientemente

Tabla 4. Comparación de las propiedades mecánicas de la palma de lata con otras maderas

Propiedad	palma de lata	PSB [18]	Roble blanco [11]	Álamo amarillo [11]
E_L GPa	13.15	10.296	12.3	10.9
E_T GPa	0.832	3.066	0.8856	0.469
G_{LT} GPa	0.331	1.361	—	0.818
G_{RT} GPa	0.23	0.746	—	0.120
ν_{LT}	0.35	0.31	0.428	0.392
ν_{RT}	0.813	—	0.618	0.703

Fuente: Elaboración propia.

bien debido a que se encuentran en los rangos adecuados para las maderas comunes.

La palma de lata presenta una corteza de alta rigidez sobre todo en la dirección de las fibras, debido a que alcanza valores de $8.18 \text{ MPa} \pm 2.32$ de esfuerzo con escasos $9.22\text{e-}4 \text{ mm/mm} \pm 5.15\text{e-}4$ en deformación, de modo que es comparable o incluso superior su módulo elástico con el de maderas duras como el roble o el álamo. Con la palma de lata y un aglomerante natural, puede producirse un material compuesto natural y biodegradable. Tal como se muestra en [4], es posible hacer uso de PVA como aglomerante, que modifica las propiedades mecánicas significativamente respecto de la palma de lata sola presentada en este estudio.

Referencias

- [1] Plotkin, M., & Famolare, L. (1992). *Sustainable harvest and marketing of rain forest products*. Island Press, Washington D.C., Estados Unidos.
- [2] Osorio, C., Carriazo, J. G. & Almanza, O. (2011). Antioxidant activity of corozo (*Bactris guineensis*) fruit by electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy. *European Food Research and Technology*, 233 (1), 103 – 108.
- [3] Prada-Garzón, R. G., Gil-González, I. J. & Rey-Soto, A. (2008). *Análisis y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la palma de lata*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- [4] Chávez, D., García, F. & Pertuz, A. (2016). *Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la palma de lata*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- [5] Bernal, R. & G. Galeano (2013). “Corozo de Lata *Bactris guineensis*”. En: *Cosechar sin destruir: aprovechamiento sostenible de palmas colombianas*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- [6] ASTM D3039/D3039M – 17 (2017). *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. American Society for Testing Materials.
- [7] ASTM D1037 - 12. (2012). *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. American Society for Testing Materials.
- [8] ASTM E132 – 17 (2017). *Standard Test Method for Poisson’s Ratio at Room Temperature*. American Society for Testing Materials.
- [9] ASTM D7078 – 12 (2012). *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method*. American Society for Testing Materials.
- [10] Palombini, F. L., Kindlein, W., De Oliveira, Jr, B. F. & De Araujo Mariath, J. E. (2016). “Bionics and design: 3D microstructural characterization and numerical analysis of bamboo based on X-ray microtomography.

- Materials Characterization*, 120, 357 – 368.
- [11] United States Department of Agriculture (1999). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. Madison: Forest Products Laboratory.
- [12] Barbero, E. J. (2012). *Finite element analysis of composite materials using ANSYS®*. Taylor & Francis, Boca Raton, Estados Unidos.
- [13] Suresh G. & Jayakumari, L. S. (2015). Evaluating the mechanical properties of E-Glass fiber/carbon fiber reinforced interpenetrating polymer networks. *Polímeros*, 25 (1), 49 – 57.
- [14] Brandt, A., Gräsvik, J., Hallett, J. P. & Welton, T. (2013). Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green Chemistry*, 15 (3), 550 – 583.
- [15] Winandy, J. E. & Rowell, R. M. (2012). “Chemistry of wood strength”, en *Handbook of wood chemistry and wood composites*, Ed. Boca Raton: CRC Press, pp. 428 – 471.
- [16] Schniewind, A. P. & Barrett, J. D. (1972). Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. *Wood Science and Technology*, 6 (1). 43 – 57.
- [17] Lempriere, B. M. (1968). Poisson’s ratio in orthotropic materials. *AIAA Journal*, 6 (11), 2226 – 2227.
- [18] Huang, D., Bian, Y., Zhou, A. & Sheng, B. (2015). Experimental study on stress–strain relationships and failure mechanisms of parallel strand bamboo made from phyllostachys. *Construction and Building Materials*, 77, 130 – 138.
- [19] Zhou, A., Huang, D., Li, H. & Su, Y. (2012). Hybrid approach to determine the mechanical parameters of fibers and matrixes of bamboo. *Construction and Building Materials*. 35, 191 – 196.