

51. Evaluación de la relación entre el diámetro y la resistencia a la tracción de las fibras piassaba (*Aphandra natalia*)

Balcázar, Cristian^{(1,2,*),} Hernández-Olivares, Francisco⁽²⁾

(*) Departamento de Arquitectura y Artes, Escuela de Arquitectura, Universidad Técnica Particular de Loja, 1101608 Loja, Ecuador, cabalcazar@utpl.edu.ec, (593) 7 3701444, ext: 2794

(1) Departamento de Arquitectura y Artes, Escuela de Arquitectura, Universidad Técnica Particular de Loja, 1101608 Loja, Ecuador

(2) Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, Escuela Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid

Resumen El desarrollo sostenible persigue reducir la extracción y uso de materiales convencionales a través del empleo de componentes naturales regenerables que provoquen impacto mínimo, o la incorporación de residuos y subproductos que puedan reciclarse. Las fibras vegetales presentan características de una solución técnica y económica, una fuente importante para su aprovechamiento son las palmas, consideradas uno de los grupos de plantas económicamente más importantes. Piassaba es la denominación para las fibras duras de color marrón, consideradas como un producto forestal no maderable que pueden obtenerse de tres especies de palma: *Leopoldinia piassaba*, *Attalea funifera* y *Aphandra natalia*. Piassaba de *Aphandra natalia* presenta propiedades mecánicas similares a las provenientes de *Leopoldinia piassaba* y *Attalea funifera* ya experimentadas en materiales compuestos. Como cualquier otra fibra natural, las fibras de *Aphandra natalia* presentan diversos diámetros o secciones, incluso en cada fibra. En varias fibras lignocelulósicas se encontró que la dimensión del diámetro afecta el valor de la resistencia a la tracción. En este trabajo se investiga la dependencia del diámetro con la resistencia a la tracción utilizando el método estadístico de Weibull. Se determinó que a menor diámetro de la fibra mayor resistencia a la tracción, que indica una ecuación hiperbólica entre la fuerza media y su diámetro.

Palabras clave Weibull, Piassaba, *Aphandra Natalia*, Resistencia a la tracción

1 Introducción

El desarrollo sostenible de la construcción persigue reducir la extracción y uso de materiales convencionales a través del empleo de recursos naturales regenerables provenientes de residuos y subproductos que puedan reciclarse. Las palmas son consideradas uno de los grupos de plantas económicamente más importantes, en Ecuador se encuentra una gran variedad de especies que brindan algún beneficio de aprovechamiento de las fibras, las hojas y los frutos.

Piassaba es la denominación de las fibras duras de color marrón, consideradas como un producto forestal no maderable, que se pueden obtener de tres especies de palma: *Leopoldinia piassaba*, *Attalea Funifera* y *Aphandra Natalia* (Kronborg, Grández, Ferreira, & Balslev, 2008).

Aphandra natalia es un recurso importante para las comunidades locales en la cuenca occidental del Amazonas. En Ecuador las técnicas de cosecha no son destructivas consisten en realizar una remoción selectiva de otra vegetación y cultivarlas ocasionalmente, sus usos tradicionales van desde el consumo de sus frutos hasta la extracción de las fibras para la venta y la cosecha de sus hojas para techar casas, su principal producto son las fibras provenientes de la vaina de la hoja y el peciolo con las que se elaboran escobas, Figura 1, (Balslev, Knudsen, Byg, & Kronborg, 2010; Pedersen, 1992).

Piassaba de *Attalea funifera* y *Leopoldinia piassaba* han sido caracterizadas y empleadas experimentalmente como refuerzos de matrices poliméricas, encontrando aplicabilidad en materiales que exijan buena resistencia al impacto y requieran incrementar la dureza (Sergio N Monteiro et al., 2006; Shimazaki & Colombo, 2010). Por otro lado, hasta el momento no se han reportado características físicas, mecánicas o químicas de las fibras de *Aphandra natalia* o su empleo como refuerzo en composites. La Tabla 1 muestra características mecánicas y estructurales de piassaba provenientes de diferentes especies.

Para muchas fibras lignocelulósicas se ha reportado una función de proporcionalidad inversa entre la resistencia a la tracción y el diámetro (Carolina, Teles, Oliveira, & Rodrigues, 2015; da Costa, Loiola, & Monteiro, 2010; S N Monteiro et al., 2011; Sergio Neves Monteiro et al., 2011). En particular las fibras de Sisal, Ramie, Curua, Jute, Bamboo, Coir, Atelea Funifera, Burite, y Piña, presentan una correlación hiperbólica entre el esfuerzo de tracción final (σ) y el diámetro equivalente (d), expresado en la siguiente función de forma:

$$\sigma = \frac{A}{d} + B \quad (1)$$

A y B son constantes características para cada tipo de fibra. La razón de una relación general especificada por la Ecu. 1 se da en términos de defectos e imperfecciones, típico de una estructura lignocelulósica. Esa correlación inversa, no se ha investigado para las fibras de *Aphandra natalia*.

Tabla 1 Características mecánicas y estructurales de piassaba provenientes de diferentes especies de palma

Origen de piassaba	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulos elásticos (GPa)	Deformación total (%)	Densidad (g/cm ³)	Celulosa (wt %)	Lignina (wt %)	Referencia
<i>Attalea funifera</i>	134,8-142,9	1,07-4,59	21,9- 7,8	–	31,6	48,4	(d'Almeida, Aquino, & Monteiro, 2006)
<i>Attalea funifera</i>	86- 123	4,499-5,449	4,00- 3,00	1,1	–	–	(Elzubair, Maria, & Bonelli, 2007)
<i>Attalea funifera</i>	134,5	6,095	3,4	1,03	5,2	43,1	(Martius, 2015)
<i>Attalea funifera</i>	131 ± 36	03.8 ± 00.9	11.4 ± 3.6	–	–	–	(Alves Fidelis, Pereira, Gomes, De Andrade Silva, & Toledo Filho, 2013)
<i>Leopoldinia piassaba</i>	22- 23	1,116-1,447	5,00- 7,00	1,13	–	–	(Elzubair et al., 2007)



Fig. 1 Principal producto desarrollado con las fibras de *Aphandra natalia*

2 Procedimiento Experimental

Se utilizó fibras de *Aphandra natalia* sin tratar, Figura 3, cosechadas en el cantón Sucúa, provincia de Morona Santiago, suministradas por los fabricantes de escobas artesanales de la ciudad de Loja (Ecuador).

El diámetro fue calculado de una muestra de 118 fibras tomadas aleatoriamente, se supuso que su forma es cilíndrica y se midió 5 puntos diferentes a lo largo de su longitud, la herramienta empleada fue un micrómetro de 0,001 mm de precisión. La Figura 4 muestra el histograma de los diferentes diámetros de piassaba, considerando 5 intervalos.

Dentro de los diámetros de las fibras señalados en el histograma, se seleccionaron 10, dos para cada intervalo. A cada fibra se la ensayo a tracción de 4 a 5 veces en puntos diferentes. El esfuerzo último a la tensión se calculó a través de la relación carga de falla y diámetro. La carga se aplicó gradualmente y se midió con un dinamómetro de 50 N. La longitud inicial entre pinzas fue de 20 mm \pm 0,1 mm, cada fibra fue marcada en dos puntos, lo que permitió obtener la longitud inicial y elongación última, a través de un calibrador de 0,01 mm de precisión. La Figura 2 esquematiza el dispositivo de prueba. Los valores obtenidos para la resistencia a la tracción, es decir, el esfuerzo último, se interpretan estadísticamente por medio de un programa de ordenador de análisis Weibull.

De acuerdo con (Carolina et al., 2015; Nacional & Trabajo, 2011), la distribución de Weibull se representa normalmente por la función acumulativa de distribución de fallos $F(x)$:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

Siendo:

χ , el parámetro de posición, define el punto de partida u origen de la distribución

θ , el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo, en nuestro caso representa la resistencia característica

β , el parámetro de forma, representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos.

La gráfica Weibull está graduada a escala funcional de la siguiente forma: En el eje de ordenadas se tiene $\ln \ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right)$ (Doble logaritmo neperiano) y en el eje de abscisas $\ln \chi$

Cualquier grupo de datos que sigan la distribución de Weibull puede representarse por una línea recta, se puede inferir que el origen es perfectamente conocido y que coincide con los datos experimentales. Partiendo de la Ecu. 2, tomando logaritmos neperianos por dos veces, tenemos:

$$\ln \ln \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) = \beta \ln \chi - \beta \ln \theta \quad (3)$$

Se utilizó los datos de 9 a 10 experimentos en los que se midió para cada intervalo de diámetro la carga de rotura de las fibras, Figura 4. El programa de ordenador construyó el gráfico lineal de la Ecu. 3 y calculó los parámetros Weibull.

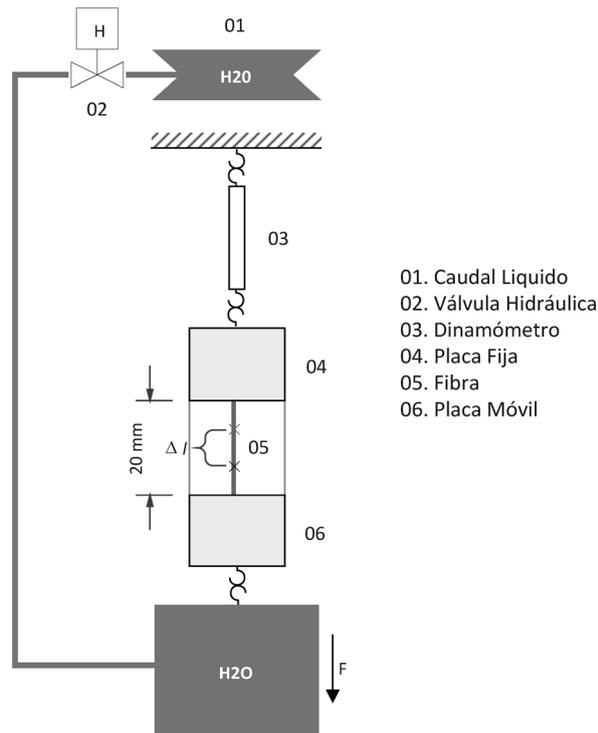


Fig. 2 Diagrama del dispositivo para ensayos a tensión



Fig. 3 Fibras de *Aphandra natalia*, extraídas de la vaina y del peciolo de las hojas

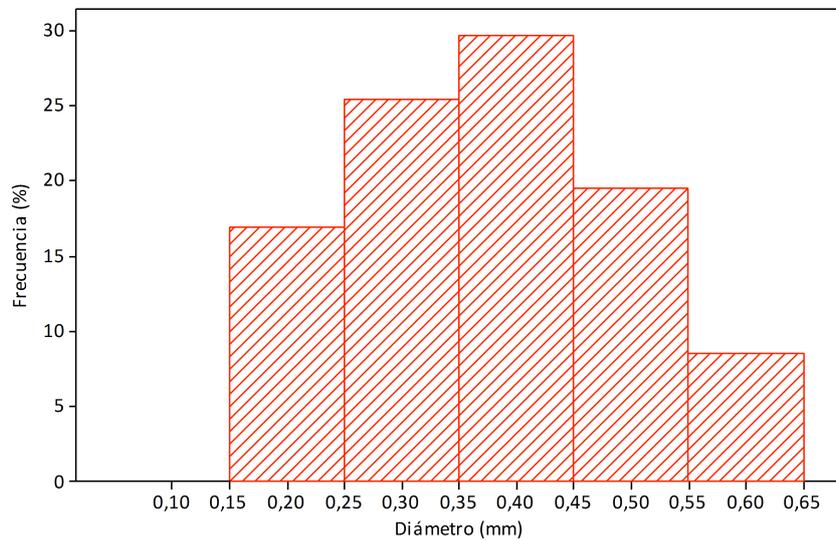


Fig. 4 Histograma de frecuencia estadística de cinco intervalos de diámetros convencionales de fibras de *Aphandra natalia*

3 Resultados y Discusión

Las fibras de *Aphandra natalia* presentan diversos diámetros, incluso en cada fibra. Se estimaron cinco diámetros característicos, siendo la mayor frecuencia relativa de distribución 29,6% correspondiente a las secciones entre 0,35 y 0,45 mm, mientras que la menor frecuencia relativa de distribución es 8,4% correspondiente a los diámetros entre 0,55 y 0,65 mm. Investigaciones similares reportan mayores frecuencias relativas de distribución a piassaba originarias de *Attalea funifera* 38% y *Leopoldina piassaba* 30%, ambas en las que los mayores diámetros se encuentran en el rango de 0,4 a 0,6 mm (Elzubair et al., 2007).

De acuerdo con (Carolina et al., 2015; Pons, 1995), y partiendo de los datos obtenidos experimentalmente, Figura 5, se determinó la resistencia a la tracción para cada intervalo de diámetro, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{4L}{\pi d^2} \quad (4)$$

Siendo:

σ , resistencia a la tracción

L, carga máxima

d, sección de la fibra

Los valores de la resistencia a la tracción se analizaron por el método Weibull, aplicado a 9 o 10 experimentos para cada intervalo de diámetro, Figura 4. El programa de análisis de Weibull proporcionó los diagramas, Figura 6, que se caracterizan por ser unimodales, es decir, con una sola línea recta ajustan los puntos en cada intervalo. Esto indica un comportamiento mecánico similar de las fibras dentro del mismo intervalo de diámetro.

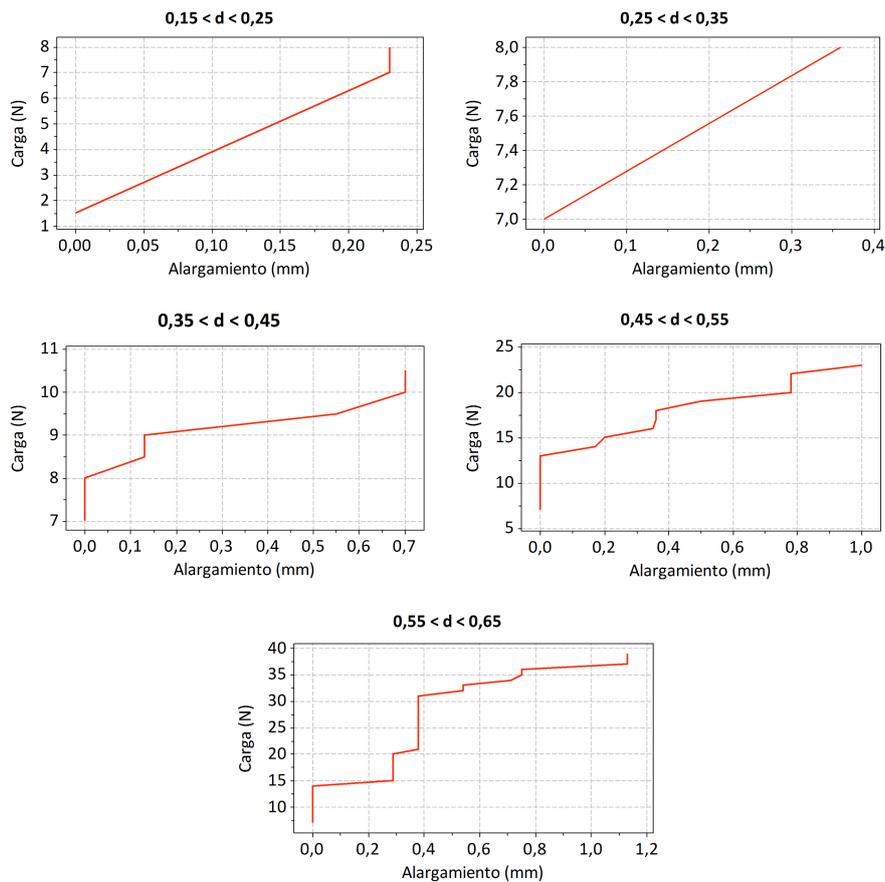


Fig. 5 Carga de tensión típica frente al diámetro de las fibras de *Aphandra natalia* para los distintos intervalos

El programa de análisis Weibull también proporcionó la resistencia característica (θ), el módulo de Weibull (β), los parámetros del ajuste de precisión (R^2), así como la resistencia media y las desviaciones estadísticas asociados. Los valores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 Parámetros Weibull para la resistencia a la tracción de las fibras de *Aphandra natalia* correspondientes a intervalos de diámetros diferentes

Intervalo de Diámetro (mm)	Módulo de Weibul, β	Resistencia Característica, θ (MPa)	Ajuste de Precisión, R^2	Resistencia Media a la Tracción (MPa)	Desviación Estadística (MPa)
0,15 < d < 0,25	1,428	184,834	0,983	183,152	47,7057
0,25 < d < 0,35	2,042	97,6595	0,888	105,43	58,4435
0,35 < d < 0,45	1,533	87,2399	0,983	88,3507	33,4141
0,45 < d < 0,55	1,549	105,424	0,963	104,923	30,7976
0,55 < d < 0,65	1,437	90,9011	0,979	91,7647	33,5328

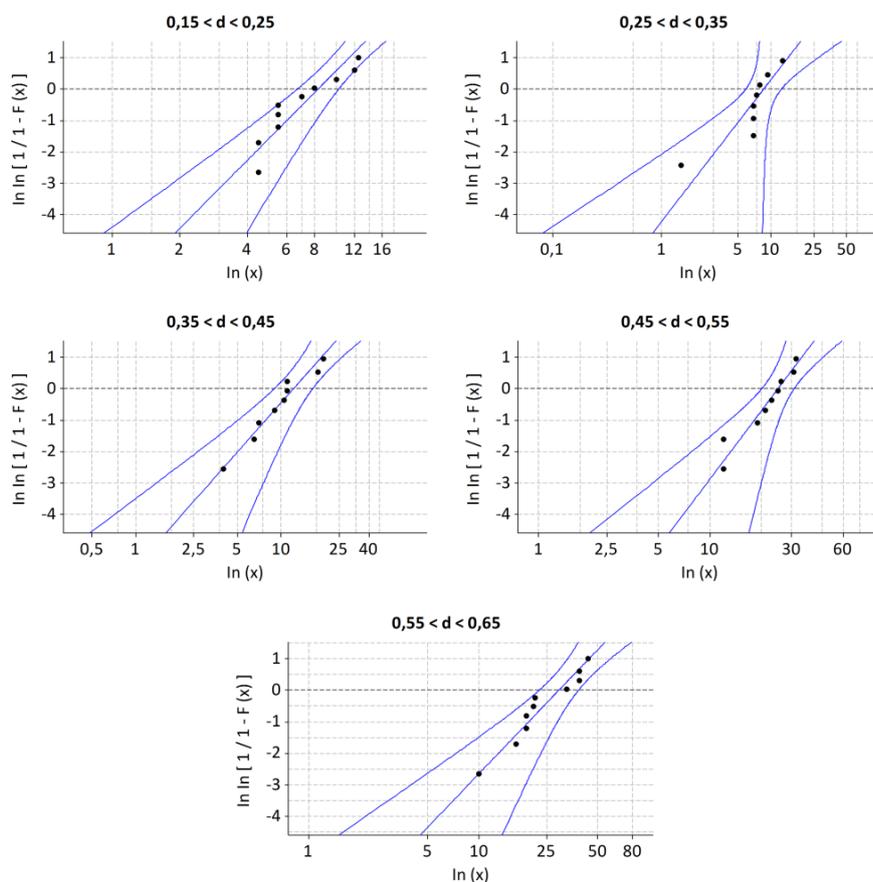


Fig. 6 Diagramas Weibull para la resistencia a la tracción de las fibras de *Aphandra natalia* en diferentes intervalos de diámetro

En la Figura 7, se muestra la tendencia de la resistencia característica (θ) para variar inversamente al diámetro medio equivalente de la fibra, los valores que se muestran en la Tabla 2 correspondientes al módulo de Weibull (β) y al ajuste de precisión (R^2), apoyan la correlación inversa

Por medio de una correlación matemática de tipo hiperbólico, se adaptó la Ecu. 1 para ajustar los datos de la Figura 7.

$$\theta(\text{MPa}) = 36,01 + \frac{26,60}{d} \quad (5)$$

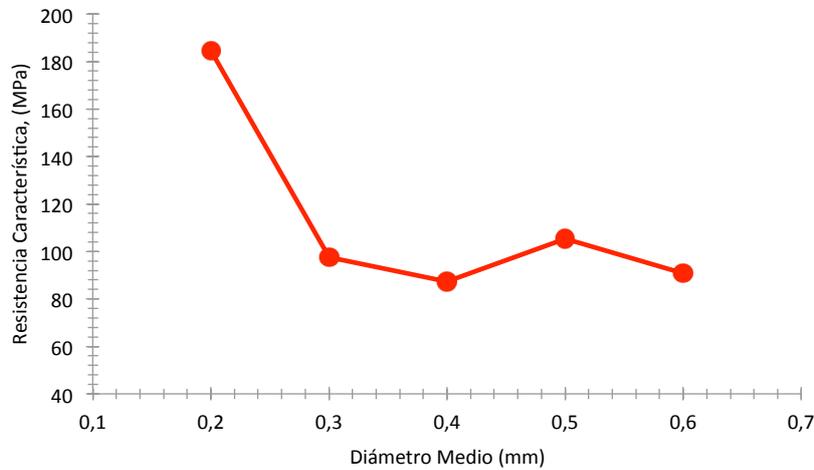


Fig. 7 Variación de la tensión característica con el diámetro medio para cada intervalo

Del mismo modo, una ecuación hiperbólica, ajusta los datos de la Figura 6:

$$\bar{\sigma}_m = 38,01 + \frac{26,43}{d} \quad (6)$$

La Ec. 6 es muy similar a la Ec. 5, indica una coherencia en el análisis estadístico de Weibull para la resistencia a la tracción con dependencia al diámetro de las fibras.

La resistencia a la tracción promedio de Weibull ($\bar{\sigma}_m$) de la Tabla 2, se representa en función del diámetro (d) en la Figura 8, también se evidencia una correlación inversa hiperbólica.

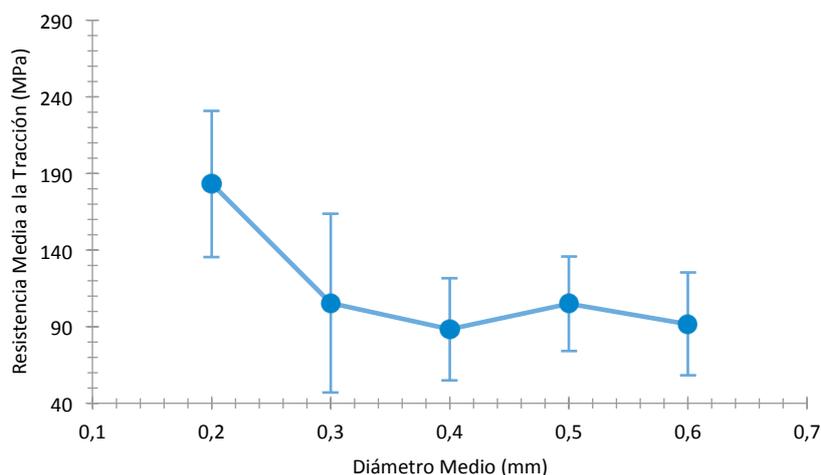


Fig. 8 Variación de la resistencia media a la tracción con el diámetro medio para cada intervalo

Las vistas microscópicas en el punto de fractura de las fibras, respaldan la correlación inversa entre fuerza y diámetro demostrada en las Ecs. 5-6. La fibra más delgada con diámetro igual a 0,2 mm, Figura 9 (a), se caracteriza por una estructura uniforme y la rotura simultánea de sus fibrillas. Estas fibrillas se disponen en menor cantidad que en las fibras más gruesas y tienden a estar más cerca reduciéndose los espacios vacíos.

Por otro lado, la fibra más gruesa con diámetro igual a 0,6 mm, Figura 9 (b), muestra más defectos y revela una fractura heterogénea asociada a un mayor número de fibrillas. La rotura total se produce cuando la primera fibrilla se rompe, propagando el defecto a toda la estructura. Estadísticamente se demuestra que las fibras de *Aphandra natalia* con menor diámetro serán más fuertes que las de mayor sección. Existe mayor probabilidad de que una fibra gruesa se rompa a una tensión inferior que una fibra más delgada.

Como observación final, en la práctica es posible seleccionar las fibras más delgadas para el desarrollo de materiales compuestos con mejores propiedades físicas o mecánicas.

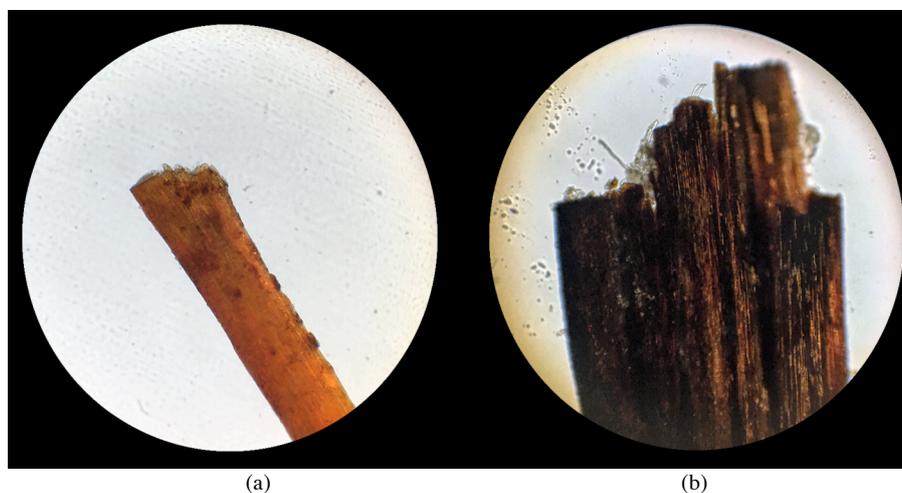


Fig. 9 Vista microscópica con misma ampliación, 100x, de fibras de *Aphandra natalia*: (a) más delgado, $d = 0,2$ mm y (b) más gruesa, $d = 0,6$ mm

4 Conclusiones

1. Se obtuvo una correlación inversa entre la resistencia a la tracción y el diámetro de las fibras. La resistencia a la tracción de las fibras de *Aphandra natalia*, mostraron a través de un análisis estadístico Weibull que los valores más altos se obtienen para las fibras con diámetros más pequeños.

2. En base a los resultados presentados y a otros estudios de fibras lignocelulósicas, se puede mencionar que una ecuación hiperbólica ajusta la correlación inversa entre la fuerza y el diámetro de las fibras de *Aphandra natalia*.

3. El análisis de falla y las vistas microscópicas apoyan estadísticamente que la fractura prematura de las fibras más gruesas se deben a la mayor distribución de fibrillas en comparación con las más delgadas.

Referencias

- Alves Fidelis, M. E., Pereira, T. V. C., Gomes, O. D. F. M., De Andrade Silva, F., & Toledo Filho, R. D. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(2), 149–157. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- Balslev, H., Knudsen, T. R., Byg, A., & Kronborg, M. (2010). Traditional Knowledge, Use, and Management of *Aphandra natalia* (Arecaceae) in Amazonian Peru. *Economic Botany*, 64(1), 55–67.

- Carolina, M., Teles, A., Oliveira, G., & Rodrigues, G. (2015). Evaluation of the Diameter Influence on the Tensile Strength of Pineapple Leaf Fibers (PALF) by Weibull Method, *18*(Suppl 2), 185–192.
- d'Almeida, J. R. M., Aquino, R. C. M. P., & Monteiro, S. N. (2006). Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *37*(9), 1473–1479. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.035>
- da Costa, L. L., Loiola, R. L., & Monteiro, S. N. (2010). Diameter dependence of tensile strength by weibull analysis: Part i bamboo fiber. *Revista Materia*, *15*(2), 97–102. <http://doi.org/10.1590/S1517-70762010000200006>
- Elzubair, A., Maria, C., & Bonelli, C. (2007). Morphological , Structural , Thermal and Mechanical Characterization of Piassava Fibers, *478*(April 2013), 37–41. <http://doi.org/10.1300/J395v04n02>
- Kronborg, M., Grández, C. A., Ferreira, E., & Balslev, H. (2008). *Aphandra natalia* (Arecaceae) – a little known source of piassava fibers from the western Amazon. *Revista Peruana de Biología*, *15*(November), 103–113.
- Martius, A. (2015). Artigo, *38*(2), 161–165.
- Monteiro, S. N., Coeli, R., Aquino, M. P., Lopes, F. P. D., Roberto, J., & Almeida, M. (2006). Tenacidade ao Entalhe por Impacto Charpy de Compósitos de Poliéster Reforçados com Fibras de Piaçava, 204–210.
- Monteiro, S. N., Lopes, F. P. D., Barbosa, A. P., Bevitori, A. B., Amaral Da Silva, I. L., & Da Costa, L. L. (2011). Natural lignocellulosic fibers as engineering materials-An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, *42*(10), 2963–2974. <http://doi.org/10.1007/s11661-011-0789-6>
- Monteiro, S. N., Satyanarayana, K. G., Ferreira, a S., Neto, J. B., Portela, T. G., & Researcher, V. (2011). Selection of high strength natural fibers. *Revista Matéria*, *15*(4), 488–505. <http://doi.org/10.1590/S1517-70762010000400002>
- Nacional, C., & Trabajo, D. E. C. D. E. (2011). NTP 331□: Fiabilidad□: la distribución de Weibull, 1–13.
- Pedersen, H. B. (1992). [1] Uses And Management Of *Aphandra Natalia* (Palmae). In *Ecuador. Bull. Inst. Fr. Études Andines*, *21*((2)), 741–753.
- Pons, J. M. (1995). Método de ensayo para la determinación del módulo inicial de elasticidad de las fibras individuales *. *Annales Scientifiques Textiles Belge*, *2*, 11. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/6177/1/Article04.pdf>
- Shimazaki, K., & Colombo, M. A. (2010). Gelatin / piassava composites treated by electron beam radiation, 303–308.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo a esta investigación a la Ph.D. Sofía Sanz González de Lema.