

LA BIOMECÁNICA DE LAS PLANTAS COMO REFERENTE PARA EL DISEÑO DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS

Andrés Valencia^{1*}, *Robin Zuluaga*², *Javier Cruz*³

1: Ingeniero Mecánico, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

2: Ingeniero Agroindustrial, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

3: Ingeniero Mecánico, PhD, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

*Contacto: andres.valencia@upb.edu.co

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo la modelación del comportamiento biomecánico estructural del peciolo de la *Ravenala madagascariensis* -*R. mad*-. El sistema peciolo-hoja debe soportar la fuerza de los vientos que generan estados de carga combinada con flexión y torsión. Además, el peciolo debe permitir que la hoja rote disminuyendo el área proyectada al viento y la fuerza de flexión, exigiendo que su estructura interna permita el funcionamiento estructural diferencial en un amplio rango elástico. Se encontró que la geometría elíptica de la sección transversal y la disposición de sus materiales o tejidos vegetales generan un sistema carcasa-relleno, son altamente anisotrópicos y afectan el comportamiento mecánico del peciolo. Se evidenció una particular distribución de los esfuerzos cortantes debidos a la torsión sobre la sección elíptica en la cual en los puntos periféricos de los ejes mayor y menor, alcanza valores muy similares. Se concluye que el peciolo es una estructura material y formalmente adaptada de manera que el uso de la estrategia carcasa-relleno evita el colapso de la sección transversal por acción del pandeo local durante la flexión. Además, que los altos niveles de deformación angular por torsión generan distribuciones uniformes de esfuerzos cortantes sobre la periferia de la sección transversal, eliminando la distorsión y pérdida de capacidad estructural para soportar la flexión simultánea que se sucede. Lo anterior convierte al peciolo de la *R. mad* en un candidato favorable para la biomimesis de patrones estructurales que inspiren el diseño de nuevos materiales y estructuras.

Palabras Clave: *Biomecánica de plantas, Diseño de materiales, Ravenala madagascariensis, Peciolo, Biomimética*

ABSTRACT

This work is based in the methodology of structural biomechanics, and looks for the structural principles under the mechanical behavior of the petiole of *Ravenala madagascariensis*, with the aim of extract from it feasible strategies for the enhancement of man-made materials design. This work included a complete characterization of the morphological and anatomical features, and of the mechanical properties of tissues under several types of mechanical loads. Besides, a model validation process, that relates the morphological and anatomical features with the mechanical properties of the tissues with the petiole overall mechanical behavior. The findings of this project allow concluding that plants combine shape, structure and materials in a hierarchical way at different scale levels to get a specifically mechanical response. In this plant, the main structural strategies identified were the use of tubular elliptical sections externally reinforced with fiber

bundles located in the periphery of cross-section, and internally filled with a porous core composed by a closed cell liquid pressurized foam-like tissue, in association with the use of highly anisotropic materials strategically distributed along the cross-section. This combination of mechanical design features generate that the differential mechanical behavior in bending and torsion needed to face the winds and natural pollinators, can be done without represent a danger of failure for the plant. The use of a very efficient and complex combination between shape and matter and a very interesting stress distribution over the cross-section under bending and torsion loads represent the most important findings of this research.

Keywords: *Plant biomechanics, Materials design, Ravenala madagascariensis, Petiole, Biomimicry*

1 INTRODUCCIÓN

El uso de referentes naturales en el diseño de materiales estructurales es una actividad con alto potencial de innovación [1, 2]. Los sistemas biológicos representan una oportunidad de trabajo que los diseñadores de materiales ven cada vez con mayor interés [3, 4]. Sus estrategias adaptativas altamente eficientes en el uso de la materia y de la forma, les da validez como referentes biomiméticos de diseño. Las plantas han sido ampliamente estudiadas debido a su variedad de soluciones estructurales [5-7]; en especial las plantas herbáceas, que al no tener madera, han desarrollado mecanismos estructurales complementarios que responden eficientemente ante las cargas. Este proyecto buscó caracterizar el comportamiento biomecánico estructural del peciolo de la *Ravenala madagascariensis* -*R. mad*- identificando sus patrones formales y materiales y sus principios estructurales, con el fin de validar posteriormente su potencial de transferencia biomimética. La *R. mad* es una planta herbácea que puede crecer hasta los 30m de altura y cuyos peciolos, elementos que unen las hojas con el tallo, pueden alcanzar los 4m de longitud y sostener hojas de hasta 4m de longitud, conformando un sistema mecánico tipo viga en voladizo de 8m de longitud. El sistema peciolo-hoja debe soportar la fuerza de los vientos que generan estados de carga combinada con flexión y torsión. Además, el peciolo debe permitir que la hoja rote para disminuir el área proyectada al viento y así la fuerza de flexión. Este comportamiento exige que la estructura interna permita el funcionamiento estructural diferencial en un rango elástico muy amplio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron peciolos maduros de plantas maduras (Figura 1a). Las muestras fueron cortadas de plantas de al menos 16 años de edad del Jardín Botánico de la ciudad de Medellín. Se usó estéreo-microscopía óptica digital, microscopía electrónica de barrido y tomografía axial computada. El análisis mecánico de la forma se hizo con ayuda de técnicas de dibujo asistido por computador. Sobre los peciolos se desarrollaron pruebas de flexión en voladizo y pruebas de torsión. Para las secciones, se hicieron pruebas de compresión transversal en las direcciones lateral y dorsoventral de las mismas utilizando el montaje para pruebas de compresión en una Máquina Universal de Ensayos Instron (Figura 1b y c). La validación de la relación entre las características morfológicas, anatómicas y mecánicas del peciolo se hizo a partir de dos modelos: el modelo de ovalización de Brazier [8] y el modelo de transformadores de forma [9]. Además, se utilizó el análisis por elementos finitos soportado en un código de cálculo denominado VULCAN

[10]. Por último, se desarrolló un experimento con tubería de cloruro de polivinilo para conducción de agua a presión que fue termo-deformada según la geometría analizada en la sección transversal del peciolo de la *R. mad* y reforzada internamente con espuma de poliuretano, para validar su posible transferencia hacia el diseño de estructuras artificiales.

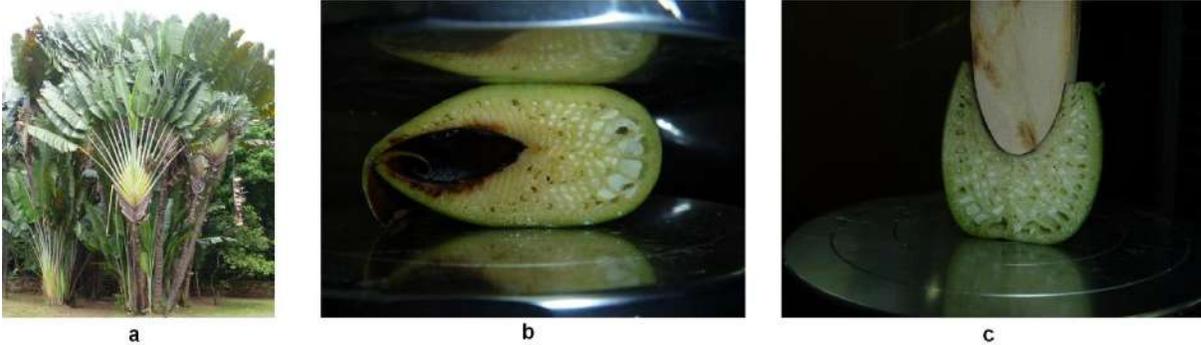


Figura 1. a: planta madura de *R. mad*. b: dirección lateral. c: dirección dorsoventral

3 RESULTADOS

El peciolo de la *R. mad* tiene una sección transversal de geometría y tamaño variable, compuesta por una carcasa rígida -tejido epidérmico- estabilizada internamente por un conjunto de haces fibrosos ubicados periféricamente -tejido esclerenquimático- embebido en una matriz porosa de celda cerrada -tejido parenquimático-; y por un relleno poroso tipo panal de abejas -tejido aerenquimático- cuyas paredes están compuestas por un material poroso de celda cerrada -tejido parenquimático- (Figura 2). La disposición de los poros del relleno sigue un patrón en el cual se mezclan líneas rectas, más delgadas, en la dirección radial con líneas elípticas, más gruesas, en la dirección circunferencial (Figura 3a y b). La sección presenta un vacío excéntrico que se mantiene a lo largo de toda la longitud y cuya forma se aproxima a la forma del perímetro de la sección. La geometría de la periferia de la sección cambia drásticamente en una zona ubicada aproximadamente a una distancia igual a la cuarta parte de la longitud total del peciolo medida desde el punto de unión con el tallo. La sección pasa de una forma de gota a una elipse casi perfecta que cambia de tamaño a medida que se acerca al punto donde la hoja se une con el peciolo (Figura 3c). Utilizando el modelo de verificación propuesto por Niklas [11] y el modelo propuesto por la mecánica de materiales, se constató que la variación geométrica en la sección transversal no obedece al principio de resistencia constante. Tanto en las pruebas de flexión como en las de torsión se encontró que la relación entre la deformación y la carga fue lineal. Utilizando la teoría de la elasticidad se calcularon la rigidez en flexión -EI- y la rigidez en torsión -GJ-, dando como resultado un comportamiento altamente diferencial, indicado por un valor promedio de la relación torsión-flexión -*twist-to-bent ratio*- igual a 42.65 ± 11.59 . Las pruebas de compresión lateral mostraron que el relleno le aporta a la sección transversal un aumento del $88.82\% \pm 0.67\%$ en la capacidad portante en la dirección lateral y de $78.83\% \pm 6.65\%$ en la dirección dorsoventral.

El modelo de transformadores de forma validó el manejo de la sección transversal como una sección cerrada y no abierta como lo es en realidad. También mostró que los valores para los

indicadores de eficiencia en flexión y en torsión fueron 1,060 y 1,650 respectivamente. El modelo de ovalización de Brazier indicó que la forma elíptica representaba un factor de seguridad en flexión para la planta. La forma elíptica de la planta tiene cerca de un 72% más rigidez en flexión que la elipse ovalizada que estaría en el límite del funcionamiento localmente estable de la sección. La pérdida de la rigidez en torsión de la elipse con respecto a una circunferencia con la misma área es de solo 14,8% +/- 0,8%.

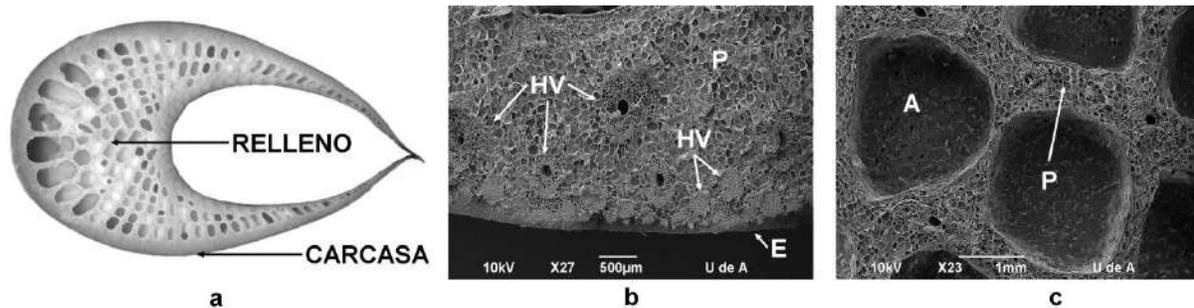


Figura 2. a: modelo carcasa-relleno de la sección transversal. b: imagen SEM de la periferia de la sección mostrando parénquima (P), haces vasculares de esclerénquima (HV) y epidermis (E). c: Imagen SEM de la parte interior del relleno mostrando aerénquima (A) y parénquima (P).

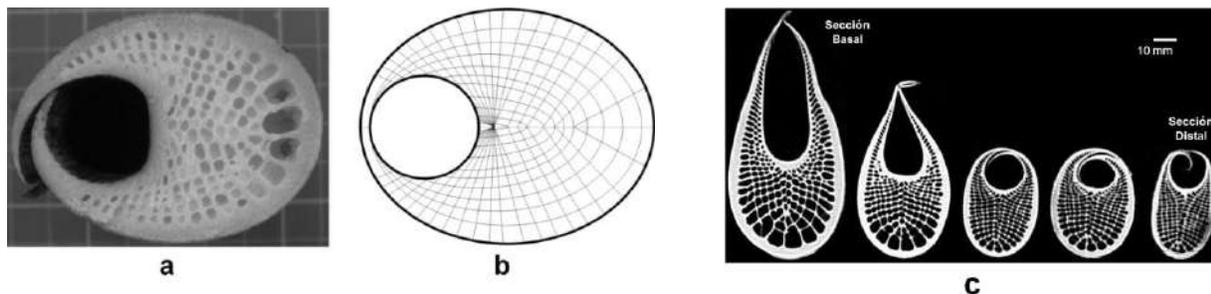


Figura 3. Geometrización del aerénquima. a: sección real. b: sección geometrizada. c: cambio en las secciones transversales del peciolo de la *R. mad* a lo largo de su eje longitudinal.

El análisis por elementos finitos indicó que los tejidos de soporte principales de la sección aportan anisotrópicamente al desempeño estructural del peciolo tanto en flexión como en torsión. La variación del módulo de Young de cada tejido en relación con los demás, mostró impactos diferentes dependiendo del orden de magnitud de la variación y del tipo de carga. Con base en los valores de referencia tomados para el cálculo de la distribución de esfuerzos normales y cortantes, se encontró que los esfuerzos normales generados por la flexión tienen una distribución que sigue los patrones de la teoría de la elasticidad, mientras que los esfuerzos cortantes generados por la torsión se distribuyen de manera que en los puntos extremos de los ejes mayor y menor de la elipse se evidencian valores muy similares que no corresponden con la teoría (ver Figura 4). Los ensayos de flexión aplicados sobre los tubos termo-deformados dieron como resultado que aquellos cuya geometría seguía el patrón elíptico obtenido desde la sección de los peciolo y estaban rellenos con la espuma de poliuretano se deformaron radialmente 81,19% menos que un tubo con sección circular con la misma área y sin relleno interno.

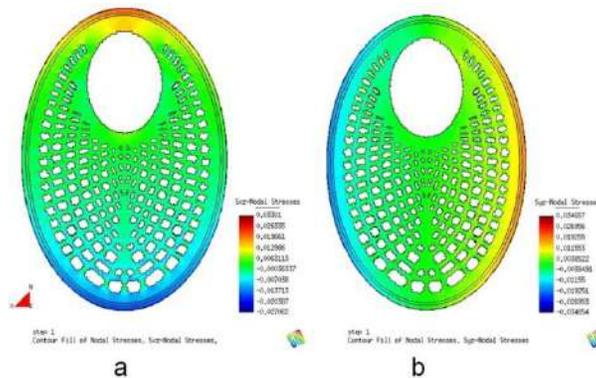


Figura 5. Distribución de esfuerzos cortantes por torsión. a: eje mayor. b: eje menor.

4 DISCUSIÓN

Las características morfológicas y anatómicas identificadas se pueden comparar en parte con aquellas presentes en otras plantas [12, 13], y se vinculan ante la necesidad de rotar su superficie foliar durante condiciones ventosas para reducir el área proyectada y con ella disminuir la fuerza aplicada sobre el sistema. El posicionamiento perimetral de los haces de fibras demuestra la especialización funcional de los tejidos para atender los esfuerzos normales de tracción generados por la flexión. Además, la presencia de un relleno poroso demostró ser un mecanismo de refuerzo para situaciones de pandeo local en elementos esbeltos de pared delgada. Tres de las características evidenciadas en el peciolo implican un comportamiento anisotrópico: la doble variación de la geometría de la sección en tamaño y en forma (*double taper*), la sección no circular y la sección abierta. Esto se ha relacionado con la dependencia del comportamiento mecánico con respecto al tipo de carga al que se somete el sistema [13]. La relación torsión-flexión de la *R. mad* mostró ser la más alta entre aquellas que se han registrado en la literatura científica [14]. Es probable que esto tenga que ver con las condiciones climáticas que la planta ha experimentado evolutivamente. La geometría elíptica de la periferia de la sección del peciolo de la *R. Mad* se muestra con una ventaja evolutiva con respecto a otras geometrías identificadas en plantas cuyas secciones son más cercanas a la circunferencia. El uso de una sección que es anisotrópica desde la forma ante cargas de flexión y torsión, puede ser una evidencia adaptativa de la planta. El relleno poroso tuvo un alto impacto en la rigidez en flexión con un aporte relativamente pequeño en el peso del sistema. Comparando el desempeño formal estructural en flexión y en torsión con respecto a otras plantas registradas en la literatura que no muestran un sistema reforzado con un relleno poroso, se observa que el peciolo de la *R. Mad* es más eficiente. La distribución de los esfuerzos cortantes sobre la sección transversal se interpreta como un aspecto que ayuda a la planta a soportar altos niveles de deformación angular por torsión sin distorsión considerable. El desempeño estructural observado por una estructura artificial basada en materiales isotrópicos, demostró que el patrón formal elíptico y el patrón funcional del relleno poroso pueden ser transferidos con éxito al campo del diseño mecánico buscando la optimización del comportamiento estructural de los sistemas.

5 CONCLUSIONES

El análisis biomecánico de sistemas estructurales vegetales representa una oportunidad para la obtención de patrones formales y materiales y de principios funcionales que pueden ser transferidos con éxito al diseño mecánico. Una mezcla compleja entre secciones transversales de geometría variable, distribuciones estratégicas de materiales y comportamiento mecánico anisotrópico de los mismos, hace del peciolo de la *R. mad* un elemento muy eficiente para mantener erguida la hoja que sostiene, aún en condiciones de carga dinámica combinada.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Pontificia Bolivariana y a Colciencias por el apoyo logístico y económico para el desarrollo de este proyecto. Además, a Catalina Rey Gallego, Yadis Álvarez, Paulina Fernández y Diego Celentano por su cooperación.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. F. V. Vincent, "The Design of Natural Materials and Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, pp. 141-146, January 1, 1990 1990.
2. C. Mattheck, *Design in nature: learning from tress*. Berlin: Springer, 1998.
3. C. Ortiz and M. C. Boyce, "Bioinspired Structural Materials," *Science*, vol. 319, pp. 1053-1054, February 22, 2008 2008.
4. K. Liu and L. Jiang, "Bio-inspired design of multiscale structures for function integration," *Nano Today*, vol. 6, pp. 155-175, 2011.
5. S. Vogel, *Ancas y palancas: mecánica natural y mecánica humana*, 1 ed. Barcelona: Tusquets editores, 2000.
6. T. B. Speck, I., "Plant Stems: Functional Design and Mechanics," *Annual Review of Materials Research*, vol. 41, pp. 169-193, 2011.
7. M. P. Fernandez, "Estado del arte en modelación funcional-estructural de plantas," *Bosque (Valdivia)*, vol. 26, pp. 71-79, 2005.
8. L. G. Brazier, "On the Flexure of Thin Cylindrical Shells and Other "Thin" Sections," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 116, pp. 104-114, 1927.
9. D. Pasini, "Shape transformers for material and shape selection of lightweight beams," *Materials & Design*, vol. 28, pp. 2071-2079, 2007.
10. D. Celentano, "Vulcan," 2.4 ed, 1999.
11. K. J. Niklas, "Testing 'Economy in Design' in Plants: are the Petioles and Rachises of Leaves 'Designed' According to the Principle of Uniform Strength?," *Annals of Botany*, vol. 71, pp. 33-41, January 1, 1993 1993.
12. T. R. Faisal, *et al.*, "Hierarchical Microstructure and Elastic Properties of Leaf Petiole Tissue in *Philodendron melinonii*," in *MRS Proceedings*, 2012.
13. A. R. Ennos, *et al.*, "The functional morphology of the petioles of the banana, *Musa textilis*," *Journal of Experimental Botany*, vol. 51, pp. 2085-2093, December 1, 2000 2000.
14. S. Vogel, "Twist-to-Bend Ratios and Cross-Sectional Shapes of Petioles and Stems," *Journal of Experimental Botany*, vol. 43, pp. 1527-1532, November 1, 1992 1992.