

CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS DEL *AGAVE* *ANGUSTIFOLIA* HAW

Magdaleno Caballero Caballero, Luis Silva Santos, Isai López Hernández, Armando José José, Carlos I. Cortés Martínez, José Luis Montes Bernabé y Rey Fernando García Méndez.

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca. Instituto Politécnico Nacional
Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, CP. 71230, Sta. Cruz Xoxocotlán, Oax., México.

Teléfono: (951) 5170610. Fax: (951) 5171199.

mcaballero@ipn.mx, luis63ss@yahoo.com.mx, isai_lh@yahoo.com.mx, jozoyno@hotmail.com,
solemia7@hotmail.com, jlmberna66@yahoo.com.mx, reyklel@hotmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del ensayo a tracción efectuado a fibras del *Agave angustifolia* Haw. El objetivo fue determinar la resistencia a tracción, porcentaje de deformación y módulo de elasticidad de las fibras en función de su ubicación en el agave. El procedimiento inició con la extracción de la fibra, después se midió el área de su sección transversal con un microscopio y finalmente las pruebas de tracción. Los resultados indican que el área de la sección transversal de la fibra es mayor en la base y disminuye progresivamente hacia la punta. La fibra extraída de las hojas localizadas en la parte inferior y media del agave presentan una resistencia a la tracción de 332 a 421 MPa, módulo de elasticidad de 18 a 20 GPa y porcentaje de deformación de 1.9 a 2.4%, disminuyendo estos valores hacia la fibra localizada en la parte superior del agave.

ABSTRACT

This study presents the results of a tensile strain test carried out on fibers of *Angustifolia* Haw Agave. The aim was to determine the resistance to tensile strain, the percentage deformation and the elastic modulus of the fibers in relation to their position in the agave. The procedure started with the extraction of the fiber, then the cross sectional area was measured with a microscope and finally the tensile strain tests were carried out. The results indicate show that the cross sectional area of the fiber is greater at the base and progressively reduces towards the point. The fibers extracted from the leaves in the lower and middle parts of the agave offered a tensile strain resistance of 332 to 421 MPa, an elastic modulus of 18 to 20 GPa and a percentage deformation of 1.9 to 2.4%, with these values reducing for fibers located in the upper part of the agave.

NOMENCLATURA

RUT Resistencia última a la tracción.
ME Módulo de elasticidad.
% Def Porcentaje de deformación.
msnm Metros sobre el nivel del mar.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Oaxaca, México se han identificado 23 especies de agave que se utilizan en la fabricación del mezcal; destacando el *Agave angustifolia* Haw [1]. En esta industria únicamente se emplea el tallo o piña y se desechan las hojas, por lo que el productor sólo aprovecha el equivalente al 45% en peso del agave. Las hojas que en su conjunto representan el 55% restante, son abandonadas en el campo a cielo abierto, contaminando el medio ambiente debido a la forma inapropiada a que son expuestas para su degradación, como se observa en la Figura 1; sin embargo en otros países, materiales con características similares son aprovechados industrialmente por su contenido lignocelulósico para obtener fibras naturales.



Fig. 1 Hojas desaprovechadas.

En una hectárea se cultivan 2 500 agaves, en promedio de cada planta se obtiene 80 hojas que se encuentran físicamente aptas para extraer fibra. Por consiguiente, en una hectárea se generan 200 000 hojas que no están siendo aprovechadas [2]. A nivel mundial se está produciendo un fenómeno enfocado hacia un aprovechamiento integral de los recursos naturales. Este hecho se realiza principalmente por el cambio en la utilización de petroquímicos a recursos renovables [3]. Se prevé que las fibras lignocelulósicas tengan una función importante en la transición respecto a las fibras sintéticas [4,5]. Las fibras vegetales tienen una trascendencia económica, pero solo se aprovechan unas cuantas como el sisal, henequén, yute, kenaf, abaca y bonote; el resto es explotado a pequeña escala, debido a falta de conocimiento de sus propiedades físicas, químicas o mecánicas [6,7,8]. Caso específico de las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw. Una de las propiedades importantes es el comportamiento mecánico a tracción, ya que incide en la calidad de fibra y sus posibles aplicaciones agroindustriales [9]. El objetivo de este trabajo fue determinar la resistencia a la tracción, el porcentaje de deformación y el módulo de elasticidad de las fibras en función de su ubicación en el agave, ya que por ser un producto de la naturaleza presentan diferente comportamiento, de modo que claramente se distinga de otras variedades de agave o plantas productoras de fibra que están siendo utilizadas a nivel mundial.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

1. Extracción de fibras.

Se seleccionó un agave de la variedad *angustifolia* Haw, en la comunidad de San Baltasar Guelavila, Tlacolula, Oax., México; localizada a una distancia de 58 km del centro de la ciudad de Oaxaca y a una altura de 1594 msnm. Las hojas se cortaron y clasificaron por niveles comenzando de la base hacia la punta de la planta, con un total de 13 niveles. Registrando las hojas por cada nivel, obteniendo 79 hojas en todo el agave. Para extraer la fibra se utilizó el proceso tradicional de enriado que consiste en las siguientes etapas: cocción, primera maceración, machacado, segunda maceración, desfibrado y secado. En todo el proceso se controló la ubicación de cada una de las hojas.

2. Medición del área de la sección transversal.

Se seleccionó de manera aleatoria una fibra por hoja, para obtener una muestra de 79 elementos. Cada fibra se dividió en tres secciones que corresponde a la base, centro y punta; de cada sección se cortó una probeta de 1 a 3 mm. Para poder manipular las probetas en el microscopio, se introdujeron en una lámina de latón, la cual tenía tres perforaciones de 0.4 mm. Enseguida se colocó sobre un portaobjetos y se observó en el microscopio compuesto Axiolab acoplado a una cámara digital Cannon PowerShot A640 y con el software de medición AxioVision LE se determinó el área transversal de la fibra en las tres secciones. Para analizar los resultados se emplearon las medidas de tendencia central y de dispersión.

3. Ensayo de tracción en tres secciones de una fibra.

De una hoja que se localiza en la parte media del agave, se seleccionó de forma aleatoria una muestra de 20 fibras [10]. Cada una de ellas se dividió en tres secciones iguales; que corresponde a la base, centro y punta de la fibra. Posteriormente se acondicionaron a una temperatura de 20 °C +/-2°C y una humedad relativa de 65% +/-2% [11]. Para el ensayo de tensión, se utilizó una máquina Instron modelo 1122, carga máxima de 2 kg, velocidad de deformación de 5 mm/min y longitud de probeta de 350 mm. El ensayo se realizó en cada una de las secciones de la fibra. El resultado que se generó directamente fue el diagrama carga-alargamiento, del cual se obtuvieron los parámetros: carga y alargamiento máximo. De manera gráfica o indirecta se calculó una aproximación del módulo de elasticidad o de Young, trazando una pendiente a la curva respecto al origen. No fue posible realizar una medición directa del módulo de elasticidad debido a que no se cuenta con la instrumentación adecuada para este tipo de

materiales, que por sus características naturales presentan variaciones en su morfología. Finalmente se aplicaron las medidas de tendencia central y de dispersión para analizar los resultados.

4. Ensayo de tracción en función de la ubicación de la fibra.

Se seleccionó de forma aleatoria 20 fibras por cada nivel [10], alcanzando una muestra de 260 fibras, posteriormente se acondicionaron a una temperatura de 20 °C +/- 2°C y una humedad relativa de 65% +/-2% [11]. Para el ensayo de tensión, se utilizó una máquina Instron modelo 1122, carga máxima de 2 kg, velocidad de deformación de 5 mm/min y longitud de probeta de 350 mm. El ensayo únicamente se realizó en la sección media de cada fibra. El resultado que se generó directamente fue el diagrama carga-alargamiento, del cual se extrajeron los parámetros: carga y alargamiento máximo y una aproximación del módulo de elasticidad de manera gráfica. Para finalmente analizar los resultados con las medidas de tendencia central y de dispersión.

RESULTADOS

1. Extracción de fibras.

El análisis de cada una de las etapas del proceso de extracción es el siguiente:

- A. Cocción. Consiste en la quema de leña en el interior de un horno y sobre el fuego colocar las hojas, volteándolas según vaya cambiando del color original a un amarillo verdoso, que indica la eliminación de la clorofila y la destrucción de su cutícula. La temperatura del horno oscila de 277 a 467 °C, la temperatura en el interior de las hojas después de la cocción es 60 a 70 °C. El tiempo promedio de cocción de una hoja es 1.25 minutos. El volumen de leña utilizado es 0.86 m³, Figura. 2a.
- B. Primera maceración. En un estanque se depositan las 79 hojas con el propósito de ponerlas en contacto con la flora microbiana existente en el agua, para que actúen sobre las sustancias que unen a las fibras y facilite su extracción, el volumen de agua utilizado es 1 980 litros y el tiempo de maceración 7 días, Figura 2b.



Fig. 2 A. Cocción. B. Maceración. C. Machacado. D. Desfibrado. E. Secado

- C. Machacado. Se golpean las hojas con un mazo de madera de 1.8 kg sobre una base del mismo material para separar su estructura exterior y acelerar la descomposición. El trabajador emplea 21 golpes y 1.48 minutos para machacar una hoja, Figura 2c.
- D. Segunda maceración. Se introducen nuevamente las hojas machacadas en el estanque en un tiempo de 7 días.
- E. Desfibrado. Se raspan las hojas con una pala metálica sobre una tabla inclinada, en la que se hace caer un flujo de agua con un caudal de 1.41 l/s, con el objetivo de eliminar la pulpa adherida a la fibra y alcanzar una mayor limpieza. El tiempo promedio para desfibrar una hoja es 1.13 minutos, Figura 2d.
- F. Secado. Se exponen las fibras a una temperatura ambiente entre los 20 y 25°C con la finalidad de eliminar la humedad en un tiempo de 1 hora, Figura 2e.

Empleando el proceso tradicional de enriado se generó 6 kg de fibra de 104 kg de hoja, en promedio de una hoja se extrae 0.075 kg, las hojas que se ubican en la parte superior de la planta tienen un contenido menor de fibra comparadas con la base y la sección media, Figura 3.

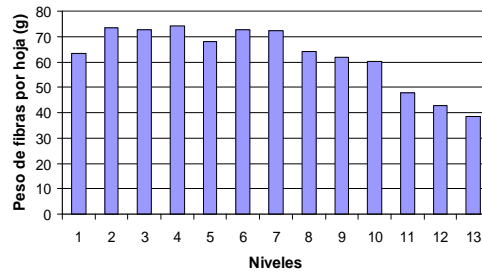


Fig. 3 Contenido de fibra promedio por hoja.

2. Medición del área de la sección transversal.

El área de la sección transversal a lo largo de la fibra es diferente. Siendo mayor en la base con un promedio de 0.058 mm^2 , en el centro 0.033 mm^2 y disminuyendo progresivamente hacia la punta con 0.017 mm^2 . Las imágenes obtenidas con el microscopio AxioLab y manipuladas con el software AxioVision, muestran que la sección transversal de la fibra está integrada por un grupo de microfibras o celdas que adoptan una forma circular o poligonal, unidas por un lumen de $3\text{--}15 \mu\text{m}$ y que rodean a cada una de las microfibras, Figura 4.

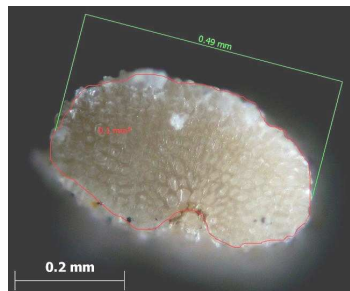


Fig. 4 Sección transversal de la fibra. 10x

Asimismo, la geometría de la sección transversal varía a lo largo de la fibra, en la base es semejante a la mitad de un anillo, en la sección media el ancho del anillo es mayor y tiende a cerrarse y finalmente en la punta forma un polígono, Figura 5.

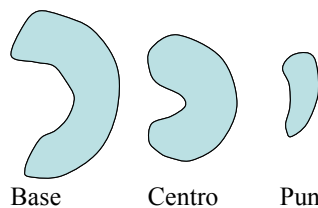


Fig. 5 Forma de la sección transversal.

3. Ensayo de tracción en tres secciones de una fibra.

La mayor resistencia última a la tracción se presenta en la punta de la fibra con un promedio de 369 MPa, seguido del centro con 322 MPa y la base con 196 MPa, mismo comportamiento se presenta con el módulo de elasticidad, en donde la punta de la fibra alcanzó en promedio 25 GPa, el centro 18 GPa y la base 11 GPa. Las medidas de dispersión indican que el coeficiente de variación es mayor en la punta de la fibra con 53%, seguido de la base con 32% y siendo menor en el centro con 29%. El porcentaje de deformación es mayor en la base con 2.37%, la punta 1.93% y el centro 0.8%.

4. Ensayo de tracción en función de la ubicación de la fibra.

Los resultados indican que la resistencia última a la tracción es mayor en las fibras que se localizan en la base del agave, es decir en los primeros niveles, alcanzando un valor máximo de 421 MPa en la fibra del nivel 3,

disminuyendo hacia las fibras que se ubican en las hojas de la parte superior de la planta, logrando un mínimo de 191 MPa en el nivel 13 Figura 6.

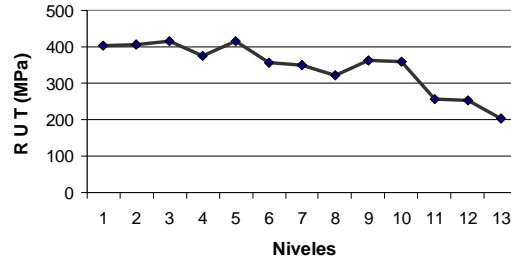


Fig. 6 Resistencia a tracción promedio por niveles.

El cálculo aproximado del módulo de elasticidad adopta un comportamiento similar a la resistencia última a la tracción, es decir el valor máximo lo alcanza en las fibras que se encuentran en los niveles de la base del agave, teniendo un máximo de 20 GPa en el nivel 2 y un mínimo de 12 GPa en el nivel 13. Mismo comportamiento ocurre con el porcentaje de deformación que tiene una máximo de 2.41% en el nivel 2 y un mínimo de 1.54% en el nivel 13.

CONCLUSIONES

El porcentaje de fibra que se puede obtener de un agave de la variedad *angustifolia* Haw empleando el proceso tradicional de enriado, representa el 5.76% del peso total de las hojas. Si en una hectárea se cosechan alrededor de 2 500 agaves, el potencial para extraer fibra es 15 toneladas/hectárea, este rendimiento podría mejorarse incorporando tecnología adecuada al proceso de extracción para hacer más eficiente cada una de las etapas y disminuir los desechos y las emisiones contaminantes.

El área de la sección transversal de la fibra es mayor en la base y disminuye progresivamente hacia la punta. La variación de los datos respecto a la media es menor en el centro de la fibra, por lo que se considera a esta parte como una zona estable. La forma de la sección transversal es similar a lo reportado para la fibra del *Agave fourcroydes* [6].

La resistencia última a la tracción así como la aproximación del módulo de elasticidad es mayor en la punta de la fibra, pero la variación de los datos respecto a la media es menor en el centro, debido a que el área de la sección transversal en esta zona no sufre cambios considerables. El tipo de comportamiento mecánico de las fibras de las hojas del *Agave angustifolia* Haw es elástico no lineal, ya que no existe una relación lineal entre la carga aplicada y la deformación resultante, únicamente se comportan linealmente al inicio de la curva, Figura 8, en donde las deformaciones son muy pequeñas.

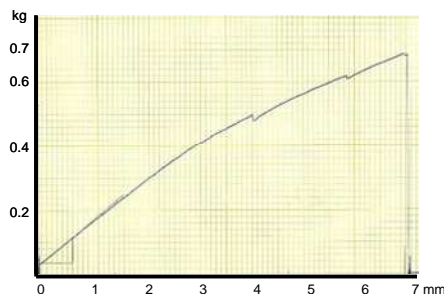


Fig. 8 Diagrama carga-alargamiento.

La resistencia última a la tracción, el porcentaje de deformación y la aproximación del módulo de elasticidad es mayor en las fibras que se extrajeron de las hojas de la base del agave y disminuyen su valor hacia las fibras de las hojas en la parte superior del agave. En la tabla 1 se presenta el resultado, obtenido con este trabajo, de la resistencia última a la tracción (RUT), el módulo de elasticidad (ME) y el porcentaje de deformación (% Def) para la fibra extraída de las hojas del *Agave angustifolia* Haw, comparadas con otras fibras que están siendo utilizadas a nivel

mundial y en donde existe una relación con el sisal y el henequén, clasificadas en el mercado internacional como fibras duras.

TABLA 1. Comportamiento Mecánico de Fibras.

Fibra	R U T [MPa]	M E [GPa]	% Def.	Ref
A. angustifolia Haw	324	17.5	1.99	
A. sisalana (sisal)	412 – 764	9.4 – 15.8	2.5 – 5	[12]
A. fourcroydes (henequén)	511 - 635	9.4 – 22	2 – 2.5	[6]
A. americana Curaua	65 – 201 500 – 1500	1.3 – 4.1 11.8	19.1 – 22.3 3.7 – 4.3	[13] [7]
Jute	393 – 773	10 – 30	1.5 – 1.8	[7]

La principal aplicación de las fibras del *Agave angustifolia* Haw, podría ser como material de refuerzo en una matriz polimérica para formar compuestos, buscando que la tracción a la que esta sometido el material se transmita parcialmente a las fibras, mejorando las propiedades mecánicas del compuesto. Otra aplicación serían los geotextiles para la recuperación de suelos erosionados. El impacto económico será directamente para los productores de la región, ya que aprovecharían de manera integral el agave, dándole un valor agregado a las hojas de la planta que son consideradas como un desecho.

RECONOCIMIENTOS

Al laboratorio de pruebas físicas de la Escuela Superior de Ingeniería Textil del Instituto Politécnico Nacional y al laboratorio de la Cámara Nacional de la Industria Textil A. C.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SAGARPA, SEDAF, y COMMAC. Plan rector del sistema producto maguey-mezcal. COMMAC. 2005.
- [2] Silva, S. L. Y Caballero, C. M. Informe técnico final del proyecto: Desarrollo de tecnologías adecuadas para el proceso de fabricación del mezcal en el estado de Oaxaca. CGPI-IPN. 2004.
- [3] FAO. Los efectos ambientales de las fibras duras y el yute en aplicaciones industriales no textiles. Consulta sobre fibras naturales. 2004.
- [4] FAO. La evolución paralela de los precios del yute y las fibras duras con los precios del polipropileno y el petróleo crudo. Consulta sobre fibras naturales. 2007.
- [5] Reddy, N., Y Yang, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *TRENDS in biotechnology*, 23, 22-27, 2005.
- [6] Cazaurang, M. M. N., Herrera, F. P. J., González, C. P. I., Y Aguilar, V. M. Physical and mechanical properties of henequen fibers. *Journal of applied polymer science*, 43, 749-756, 1991.
- [7] Satyanarayana, K. G., Guimaraes, J. L., Y Wypych, F. Studies on lignocellulosic fibers of brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*, 38, 1694-1709, 2007.
- [8] Tomczak, F., Demétrio, S. T. H., Y Satyanarayana, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II. Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*, 38, 1710-1721, 2007.
- [9] John, M. J., Y Thomas, S. Review. Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71, 343-364, 2008.
- [10] NMX-A-069-INNTEX-1990. Determinación de la carga de ruptura, tenacidad y al alargamiento por método de hilo individual.- Método de prueba. Normas Textiles Mexicanas.
- [11] NMX-A-110-INNTEX-2005. Acondicionamiento de fibras y productos textiles para su ensayo-Método de prueba. Normas Textiles Mexicanas.
- [12] Li, Y., Hu, C., Y Yu, Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*. Accepted manuscript, 1-36, 2007.
- [13] Bessadok, A., Marais, S., Roudesli, S., Lixon, C., Y Métayer, M. Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres. *Journal composites: Part A: applied science and manufacturing*, 39, 29-45, 2008.