

Evaluación mecánica de fibra de cannabis sativa mediante Microscopía de Fuerza Atómica.

Ariel Fuerte-Hernández¹, Juan Vicente Méndez-Méndez², Israel Arzate-Vázquez², Samuel Morales-Bonilla¹, Juan Pablo Campos-López¹, Iván Altamirano-Olguín¹

¹Cuerpo Académico de Biomecánica, División de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica del Valle de México, México. Email: ariel.fuerte@upvm.edu.mx, samuel.morales@upvm.edu.mx, juanpablo.campos@upvm.edu.mx, ivan.altamirano@upvm.edu.mx

²Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: jmendezm@ipn.mx, iarzate@ipn.mx

Resumen

Este trabajo evalúa las propiedades mecánicas y la estructura de fibras de cáñamo, el objetivo es investigar el comportamiento nano-mecánico de la fibra de cáñamo de la sección transversal y longitudinal del tallo y evaluar su morfología. El uso de cáñamo tiene potenciales aplicaciones en la industria automotriz, del plástico, de la construcción y textil. Se realizaron pruebas mecánicas en fibras de cáñamo, así como el análisis de su estructura y rugosidad mediante la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica (MFA). De este modo se obtuvo la rugosidad Ra y Rq, así como las curvas de fuerza (mN) vs distancia-indentación (nm) mediante un modelo de Hertz para obtener el módulo de Young de las fibras del tallo de cáñamo. Se encontró que las propiedades mecánicas a nivel nanométrico dependen de factores como la composición química y arreglo estructural, la zona del tallo y de las células presentes como la lignina.

Palabras clave: cáñamo; propiedades mecánicas; Microscopía de Fuerza Atómica; rugosidad.

Abstract

This work evaluates the mechanical properties and structure of hemp fibers, the objective is to investigate the nano-mechanical behavior of hemp fiber from the cross and longitudinal section of the stalk and to evaluate its morphology. The use of hemp has potential applications in the automotive, plastic, construction and textile industries. Mechanical tests were carried out on hemp fibers, as well as the analysis of their structure and roughness by means of Atomic Force Microscopy (AFM). In this way, the roughness Ra and Rq, the force curves (mN) vs distance-indentation (nm) were obtained using a Hertz model to obtain the Young's modulus of the hemp stalk fibers. It was found that the mechanical properties at the nanometer level depend on factors such as chemical composition and structural arrangement, the stem area analyzed and the cells present such as lignin.

Keywords: hemp; mechanical properties; Atomic Force Microscopy; roughness.

1. Introducción

Las aplicaciones que tiene el cáñamo van desde la industria automotriz y del plástico, la de la construcción, en el equipamiento médico, la industria del transporte, dispositivos de almacenamiento, dispositivos eléctricos, hasta la industria textil [1-2].

El amplio uso de los materiales como el plástico generan gran cantidad de contaminantes alrededor del mundo [3], para combatir este problema, se propone el

uso de materiales biológicos capaces de tener propiedades mecánicas similares a estos.

El objetivo de este trabajo es estudiar las propiedades mecánicas de fibras de cáñamo a nivel nanométrico y generar materiales compuestos, los cuales puedan utilizarse como sustituto de ciertos plásticos y materiales de construcción [4]. La generación de materiales compuestos a base de fibras de cáñamo puede disminuir el impacto negativo al medio ambiente al sustituirse por materiales sintéticos que relativamente requieren de más tiempo para su

biodegradación [5]. Por otra parte, no está claro cómo influyen las características mecánicas a nivel micro y nanométrico en el comportamiento de materiales compuestos a nivel macroscópico [6].

La fibra de cáñamo se considera un residuo y subproducto, por lo que su aprovechamiento en aplicaciones industriales es benéfico para el medio ambiente y las cadenas de producción. Estas aplicaciones requieren de comparar las propiedades mecánicas a nivel macro, micro y nanométrico, para satisfacer los requerimientos mecánicos a los que serán sometidos. En este sentido, algunos materiales compuestos reforzados a base de fibra de cáñamo presentan diversas propiedades mecánicas dependiendo de la matriz elegida para su elaboración, por ejemplo, la resistencia a la flexión y a la tracción de materiales compuestos con matriz de resina epoxi es superior a la de los materiales con matriz poliéster [7]. Otro aspecto determinante en las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibras de cáñamo es la longitud de la fibra, algunos estudios sugieren que la longitud óptima es de 15mm [8].

Asimismo, la remoción de algunos polímeros presentes en las fibras naturales como la pectina y la hemicelulosa, también influyen de manera importante en las propiedades mecánicas del cáñamo utilizado como elemento de refuerzo en biocompuestos, como lo demuestran estudios al respecto, donde se indica que la eliminación de la pectina incrementa la rigidez y el esfuerzo último a la tensión, mientras que la eliminación de la hemicelulosa incrementa la rigidez, pero disminuye el esfuerzo último a la tensión [9].

A nivel tejido, las fibras de cáñamo son utilizadas en la elaboración de cuerdas, las cuales muestran propiedades mecánicas a la tensión que son de utilidad para estimar la respuesta estructural en la elaboración de materiales compuestos a base de fibras vegetales [10]. Cuando las fibras de cáñamo se mezclan con otras fibras vegetales, la resistencia a la tensión y a la flexión elevan su valor considerablemente [11]. Los tratamientos que se le dan a las fibras de cáñamo a base de enzimas como las lacasas, también puede incrementar algunas propiedades mecánicas como la rigidez y el esfuerzo último a la tensión, sin embargo, otras pueden disminuir, como la deformación de fractura [12].

Las propiedades micromecánicas de la fibra de cáñamo han sido estudiadas mediante Análisis de Elemento Finito y comparadas con otras fibras como el lino, los resultados muestran una relación entre las características morfológicas, bioquímicas y de la pared celular, mientras que las principales diferencias entre ambas fibras se deben a la dispersión de algunas de sus

propiedades morfológicas y ultraestructurales, lo que repercute directamente en las propiedades mecánicas a tensión y la rigidez, incluyendo factores como el diámetro de fibra y la fracción de masa de la celulosa cristalina [13]. Algunos estudios relacionados con las propiedades mecánicas de las paredes celulares de las fibras del tallo de cáñamo fueron analizados mediante la técnica de nanoindentación. Los resultados muestran diferencias en las propiedades mecánicas según la zona del tallo analizado [6].

Existe un hueco en el conocimiento sobre el comportamiento mecánico de las fibras de cáñamo a nivel transversal a diferentes escalas. En un estudio comparativo sobre las propiedades mecánicas de fibras vegetales y un material sintético como el kevlar, se encontró que presenta un alto grado de anisotropía e inelasticidad, lo que sugiere que se debe a la estructura del material, así como al colapso de algún lumen como sus principales causas [14].

En este trabajo se estudia la estructura de fibras de los tallos, así como la evaluación mecánica de las paredes celulares del tallo de cáñamo mediante la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica (MFA). El propósito es encontrar si existe relación de las propiedades mecánicas y de su estructura a nivel nanométrico con lo encontrado en la literatura a nivel micrométrico y de tejido, debido a que aún permanecen lagunas en el conocimiento de dichas relaciones. Otra pregunta planteada es saber si las propiedades mecánicas de las fibras presentan diferencias significativas cuando son probadas con orientación longitudinal y transversal.

La MFA es una técnica de gran ayuda para determinar la estructura de diversos sistemas vegetales, con la que se pueden observar la morfología, rugosidad y espesores de los componentes estructurales. Asimismo, nos permite determinar las propiedades mecánicas como la dureza y el módulo de elasticidad aparente.

1.1. Microestructura y composición química de las fibras de tallo de cáñamo

La microestructura de las fibras de cáñamo está conformada por una pared celular primaria que rodea la pared celular secundaria y una lamela media. La pared celular primaria está compuesta por celulosa y hemicelulosa, las cuales constituyen aproximadamente el 10% de la sección transversal de la célula, mientras que la pared celular secundaria tiene un alto contenido celulósico que contribuye de una manera importante a conferirle las propiedades mecánicas particulares del cáñamo [15].

Los tallos tienen la función de transportar agua y nutrientes a toda la planta y dar soporte estructural. La composición química es similar a la del algodón, pero

con fibras más gruesas y resistentes, contiene celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ y hasta 12% de su peso en agua, tiene una densidad de 1.470-1.250 kg/m³; módulo de elasticidad de 50-70 GPa; límite elástico de 200-400 MPa; resistencia a la tensión de 550-920 MPa; elongación 1.4-1.7 % de la deformación unitaria [16].

2. Metodología

2.1. Preparación de las muestras

Se obtuvieron muestras de cáñamo (*cannabis sativa*) que fueron procesadas para obtener el tallo. Las plantas tuvieron un periodo de crecimiento vegetativo de 10 semanas. Después de cortado, el tallo fue sometido a un proceso artesanal en el cual se secó a temperatura ambiente antes de ser utilizado para la preparación de las muestras. Una vez seco, el tallo fue remojado durante 3 días y vuelto a secar a temperatura ambiente durante otros 5 días para proporcionar mayor flexibilidad, tratando de simular el proceso de preparación para la obtención de cuerdas de cáñamo.

la siguiente secuencia de graduación P400, P800, P1000, P1200, P1500, P200 y finalmente se utilizó un paño con alúmina de 0.3 micrómetros.

2.2. Estructura del tallo de cáñamo

La estructura de la sección transversal del tallo del cáñamo esta representada en la Figura 1. Según [6], el tallo del cáñamo puede dividirse en 3 partes llamadas floema, xilema y médula. La xilema tiene una apariencia similar a la madera, sin embargo, su densidad es de solo 0.24-0.26 g/cm³, lo que, en conjunto con su alta resistencia a la tensión y su bajo costo, lo hace un material con potenciales aplicaciones industriales, así como amigable con el medio ambiente, ya que la generación de CO₂ es prácticamente igual a la que consume la planta.

La microestructura de las muestras fue observada mediante un microscopio óptico Olympus Japan modelo BX51, el cual cuenta con un sistema de

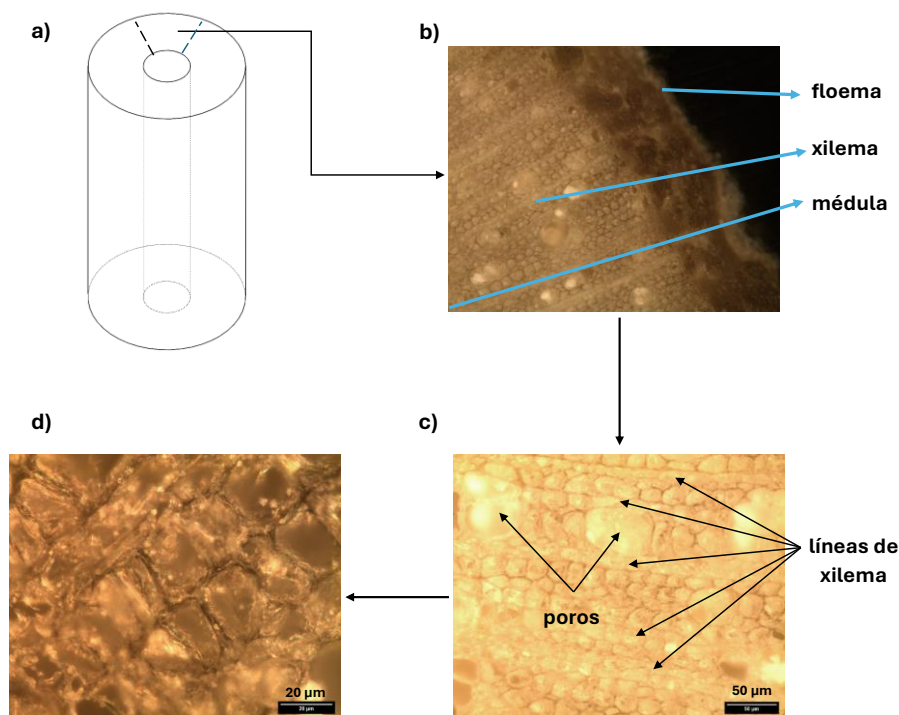


Figura 1. Esquema de la sección transversal del tallo de cáñamo y sus estructuras celulares: a) Muestra del corte de tallo, b) Sección transversal del tallo, c) Estructura del xilema en el tallo, d) Estructura de la pared celular en las fibras del tallo. Fuente: elaboración propia.

Después de este proceso, los tallos fueron cortados en trozos de aproximadamente 2 cm y encapsulados en resina epóxica. Las muestras de tallo se colocaron de manera transversal y longitudinal para su análisis. Posteriormente, fueron pulidas con lijas de carburo de silicio graduadas de acuerdo con la norma FEPA, con

iluminación y autoenfoco con lentes de 1.25X a 100X. Todas las imágenes fueron capturadas con magnificaciones de 10X, 20X, 50X y 100X utilizando una resolución de 1280x1024 pixeles, la Figura 2 muestra la sección longitudinal y transversal del tallo de cáñamo.

En la Figura 2 se observan dos cortes, uno de la sección longitudinal y otro de la sección transversal. En este estudio se realizaron pruebas a muestras de ambas secciones, esto con el objetivo de observar las posibles diferencias de sus propiedades mecánicas a nivel nanométrico que puedan llegar a haber entre ellas.

utilizado para describir directamente la rigidez de materiales biológicos, ya que este es una medida proporcional de la rigidez. Por lo tanto, la rigidez en la pared celular de la xilema en el tallo de cáñamo esta asociada de una manera directa a los valores del módulo de Young calculados mediante el modelo de Hertz (esférico) (Ecuación 1).

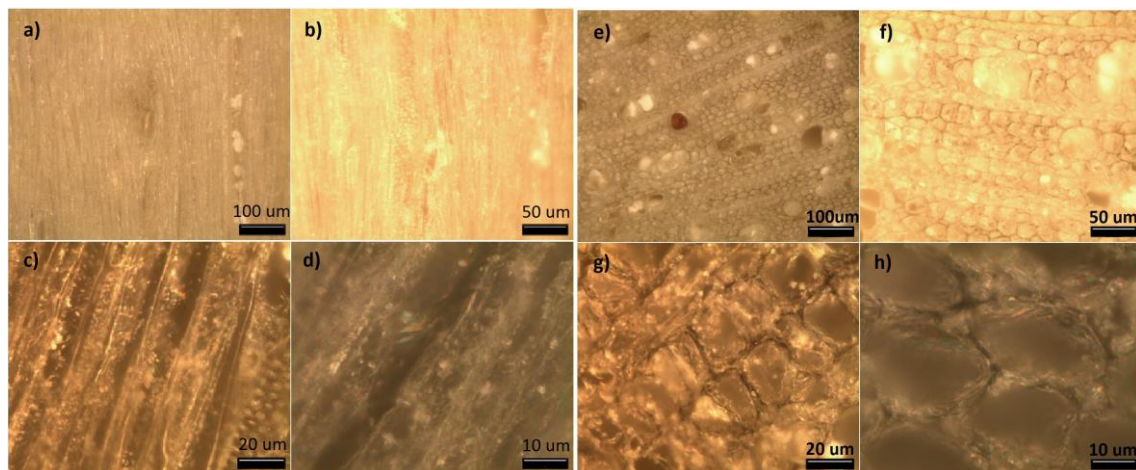


Figura 2. Vista de sección longitudinal: a) Magnificación 10X, b) Magnificación 20X, c) Magnificación 50X, d) Magnificación 100X. Vista de sección transversal: e) Magnificación 10X, f) Magnificación 20X, g) Magnificación 50X, h) Magnificación 100X. Fuente: elaboración propia.

2.3. Microscopía de Fuerza Atómica (MFA)

La técnica de MFA fue utilizada para analizar el comportamiento mecánico a nivel nanométrico. Esta técnica se basa en la interacción de fuerzas intermoleculares entre la punta y la muestra a escanear. Se obtuvieron imágenes de diferentes áreas de barrido en la superficie de las muestras del tallo de cáñamo, como se muestra en la Figura 1, para este objetivo se utilizó un microscopio de fuerza atómica Bio-AFM (Bioscope-Catalyst, Bruker, USA). Las imágenes topográficas se obtuvieron utilizando un mapeo cuantitativo nano-mecánico (MCN) y las regiones de indentación fueron seleccionadas utilizando un lente mono-objetivo (Nikon 10X). Las indentaciones fueron realizadas en la pared celular dentro de la zona de la xilema, tanto de manera longitudinal como transversal.

Las curvas de fuerza (mN) vs distancia-indentación (nm) fueron obtenidas mediante el modo de apuntar y disparar. El módulo de Young (E , resistencia a la deformación elástica, es decir, la recuperación elástica) fue calculado con el software Nanoscope Analysis v2.0 (Bruker, USA) usando un modelo de Hertz (esférico) Ecuación (1). El módulo de Young fue estimado asumiendo un valor del coeficiente de Poisson de $\nu=0.3$. Según [17], el módulo de Young puede ser

$$F = \frac{2}{\pi} \frac{E}{(1-\nu^2)} \delta^2 \tan \alpha \quad (1)$$

Donde F es la fuerza; E es el módulo de Young; ν el coeficiente de Poisson; δ la distancia de indentación (nm) y α es el ángulo medio de la punta. Se realizaron 100 indentaciones por cada sección, una en la longitudinal y otra en la transversal. Diversos estudios se enfocan en el análisis de fibras vegetales a nivel micrométrico y nanométrico [18-25].

3. Resultados y discusiones

Los resultados de las imágenes morfológicas se calcularon mediante los parámetros de rugosidad R_a y R_q para la sección longitudinal y la transversal. Los valores de rugosidad obtenidos en la sección longitudinal fueron: $R_a = 7.56$ nm y $R_q = 9.84$ nm, mientras que en la sección transversal fueron: $R_a = 635$ nm y $R_q = 910$ nm respectivamente.

Los valores de rugosidad mostrados para la sección longitudinal son relativamente bajos. Esto puede estar relacionado con su estructura y composición química, la cual a nivel microscópico es más homogénea en la sección longitudinal que en la transversal. Otro factor puede deberse a una organización menos irregular de las células pertenecientes a la xilema en la sección

longitudinal, esto se observa en la forma de su ensamble celular mediante estructuras más ordenadas y estables que minimizan las irregularidades y que no presentan poros como en la sección transversal.

De acuerdo con estudios sobre el comportamiento mecánico de las fibras de cáñamo [1,14], estas presentan una alta resistencia a fuerzas de tensión, pero con una densidad baja a nivel nanométrico en la estructura de la xilema, lo que probablemente se deba a un crecimiento controlado y uniforme de sus estructuras que proporciona una mayor homogeneidad de la fibra en la sección longitudinal que en la transversal.

La rugosidad en los vegetales, junto con otras características específicas tanto químicas como físicas de cada planta, pueden ser una barrera física contra patógenos, herbívoros y daños mecánicos. La investigación sobre el comportamiento mecánico a nivel nanométrico y su relación con la función de las

en 3D y de altura de la sección longitudinal y transversal del tallo de cáñamo obtenidas mediante la técnica de MFA.

Los resultados obtenidos para el caso de la nanoindentación fueron para la sección longitudinal con un módulo de Young de $2,294.2 \text{ MPa} \pm 146.8$, mientras que para la sección transversal el módulo de Young fue de $35,121.5 \text{ MPa} \pm 719.1$.

El modulo de Young de la sección transversal fue considerablemente mayor al obtenido en la sección longitudinal. Una posible causa de esta diferencia puede ser el acomodo que tiene la estructura, ya que en la sección transversal su conformación es más ordenada, como lo muestran las imágenes del microscopio óptico. A nivel tejido, esto se ve reflejado en la alta resistencia de las fibras a esfuerzos de tensión, en este caso, también es probable que esto se deba a la conformación de cavidades que le confieren mayor resistencia en conjunto con el arreglo estructural.

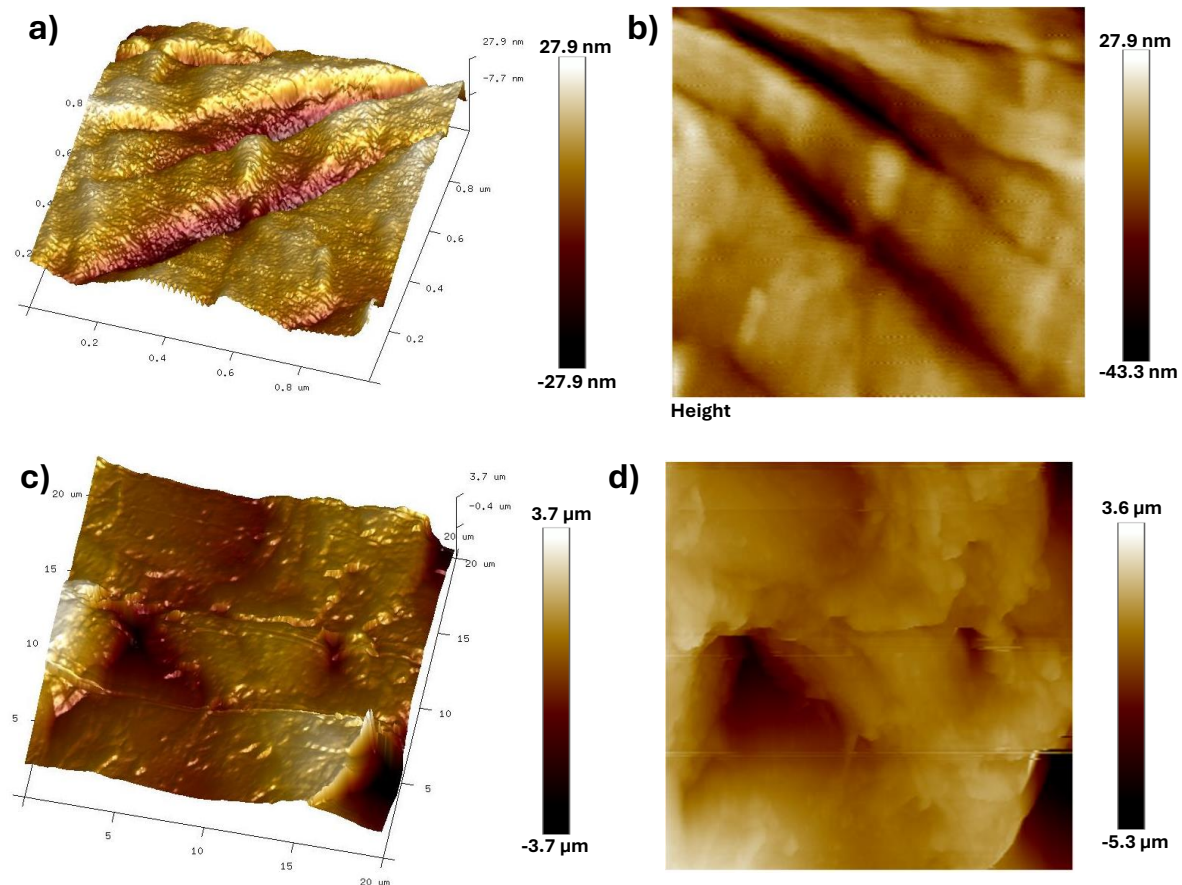


Figura 3. a) Imagen topográfica 3D de la sección longitudinal, b) Altura de la sección longitudinal, a) Imagen topográfica 3D de la sección transversal, b) Altura de la sección transversal. Fuente: elaboración propia.

estructuras del tallo de cáñamo aún no está del todo clara, por lo que es necesario profundizar a este respecto. La Figura 3, muestra imágenes topográficas

De acuerdo con [6], los resultados de las propiedades mecánicas a nivel micrométrico, estas varían con respecto a la zona del tallo, esto debido a la

cristalinidad, ya que esta disminuye ligeramente de la parte inferior hacia la parte superior. En general hay variaciones de estas propiedades mecánicas (módulo de Young y dureza) en la pared celular de acuerdo con la zona del tallo analizado. Estas variaciones parecen estar relacionadas con el grado de cristalinidad de la zona local, considerando que la capa S2 de la pared celular secundaria, es la más determinante en las propiedades mecánicas de las fibras sencillas.

También se encontró en [6], que el módulo de Young es más grande en la zona media de los tallos, de 16.9 GPa \pm 2.61. A nivel micrométrico uno de los principales componentes que influyen en las propiedades mecánicas es el contenido de lignina. Las diferencias en el módulo de Young a nivel micrométrico encontradas en [6], en contraste con las obtenidas en este estudio a nivel nanométrico son relativamente más grandes en la sección longitudinal, contrario a lo que sucede en la sección transversal, donde se ve una diferencia más amplia en este estudio que lo encontrado en [6]. Estas diferencias pueden ser debidas a la rigidez presentada en zonas locales, así como el arreglo de diferentes células que confieren más resistencia a nivel micrométrico, como es el caso de la lignina.

4. Conclusiones

El módulo de Young del tallo de cáñamo es considerablemente más grande en la sección transversal que en la longitudinal, esto puede deberse a factores como el arreglo estructural de la planta conforme se va presentando su desarrollo y crecimiento, factores como la cantidad de agua, minerales y condiciones ambientales. Lo que provoca una distribución de componentes químicos (principalmente la lignina) a lo largo de las células y estructuras del tallo, que influyen en las propiedades mecánicas del tallo. En la sección transversal, también hay variaciones de las propiedades mecánicas, esto debido a que el centro (médula) es más blanda y con más cavidades, y que en una edad más madura puede ser absorbida por la misma planta, dejando una cavidad central, mientras que las zonas más externas, presentan mayor dureza, lo cual ayuda a la planta a defenderse de elementos patógenos y de herbívoros.

Otro factor que muy probablemente influye en las propiedades mecánicas del tallo a nivel nanométrico es el crecimiento de la planta, lo que provoca un reacomodo de las estructuras que la hacen más rígida. La edad de la planta, las condiciones de cultivo y la preparación de las muestras son otros factores que también influyen en las propiedades mecánicas del tallo del cáñamo. Estudios que contemplen todas estas variables, son necesarios para ampliar el conocimiento

sobre las correlaciones entre estructura y propiedades mecánicas.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías (CNMN) del Instituto Politécnico Nacional, así como de la Universidad Politécnica del Valle de México.

6. Referencias

- [1] H. S. Sankari, "Comparison of bast fibre yield and mechanical fibre properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars," 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com
- [2] B. Murali, P. Yogesh, N. K. Karthickeyan, and D. Chandramohan, "Multi-potency of bast fibers (flax, hemp and jute) as composite materials and their mechanical properties: A review," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 1839–1843, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.001.
- [3] A. Kronbergs, E. Širaks, A. Adamovičs, and Ē. Kronbergs, *MECHANICAL PROPERTIES OF HEMP (CANNABIS SATIVA) BIOMASS*, vol. 1. 2011.
- [4] A. Abot *et al.*, "Effects of cultural conditions on the hemp (*Cannabis sativa*) phloem fibres: Biological development and mechanical properties," *J Compos Mater*, vol. 47, no. 8, pp. 1067–1077, Apr. 2013, doi: 10.1177/0021998313477669.
- [5] S. Olhan, B. Antil, V. Khatkar, and B. K. Behera, "Mechanical, thermal, and viscoelastic behavior of sisal fibre-based structural composites for automotive applications: Experimental and FEM analysis," 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117427.
- [6] X. Li, S. Wang, G. Du, Z. Wu, and Y. Meng, "Variation in physical and mechanical properties of hemp stalk fibers along height of stem," *Ind Crops Prod*, vol. 42, no. 1, pp. 344–348, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.05.043.
- [7] A. C. C. Neves *et al.*, "Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1296–1304, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.JMRT.2019.11.056.

- [8] T. Haghighatnia, A. Abbasian, and J. Morshedian, "Hemp fiber reinforced thermoplastic polyurethane composite: An investigation in mechanical properties," *Ind Crops Prod*, vol. 108, pp. 853–863, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.INDCROP.2017.07.020.
- [9] M. Liu, A. S. Meyer, D. Fernando, D. A. S. Silva, G. Daniel, and A. Thygesen, "Effect of pectin and hemicellulose removal from hemp fibres on the mechanical properties of unidirectional hemp/epoxy composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 90, pp. 724–735, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.08.037.
- [10] C. Pepi, M. E. Pipistrelli, and M. Gioffrè, "Random modeling of hemp fibers mechanical properties," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 183, p. 108203, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2024.108203.
- [11] G. A. Sivasankar, P. Arun Karthick, C. Boopathi, S. Brindha, R. J. T. Nirmalraj, and A. Benham, "Evaluation and comparison on mechanical properties of abaca and hemp fiber reinforced hybrid epoxy resin composites," *Mater Today Proc*, May 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.04.400.
- [12] M. Liu *et al.*, "Oxidation of lignin in hemp fibres by laccase: Effects on mechanical properties of hemp fibres and unidirectional fibre/epoxy composites," 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.01.026.
- [13] A. Del Mastro, F. Trivaudey, V. Guicheret-Retel, V. Placet, and L. Boubakar, "Investigation of the possible origins of the differences in mechanical properties of hemp and flax fibres: A numerical study based on sensitivity analysis," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 124, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105488.
- [14] J. Govilas, A. Chevallier, W. Akleh, J. Beaugrand, C. Clévy, and V. Placet, "Mechanical behavior and apparent stiffness of flax, hemp and nettle fibers under single fiber transverse compression tests," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 185, p. 108321, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108321.
- [15] M. George, P. G. Mussone, Z. Abboud, and D. C. Bressler, "Characterization of chemically and enzymatically treated hemp fibres using atomic force microscopy and spectroscopy," *Appl Surf Sci*, vol. 314, pp. 1019–1025, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.06.080.
- [16] "Introduction: material dependence," 2013. [Online]. Available: <http://www.photoeverywhere.co.uk>
- [17] G. N. Barrera, J. Méndez-Méndez, I. Arzate-Vázquez, G. Calderón-Domínguez, and P. D. Ribotta, "Nano- and micro-mechanical properties of wheat grain by atomic force microscopy (AFM) and nano-indentation (IIT) and their relationship with the mechanical properties evaluated by uniaxial compression test," *J Cereal Sci*, vol. 90, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jcs.2019.102830.
- [18] K. Karthik *et al.*, "State of the Art: Natural Fibre-Reinforced Composites in Advanced Development and their Physical/Chemical/Mechanical Properties," *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, p. 100415, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.CJAC.2024.100415.
- [19] A. Gupta, S. M. Shohel, M. Singh, and J. Singh, "Study on mechanical properties of natural fiber (Jute)/synthetic fiber (Glass) reinforced polymer hybrid composite by representative volume element using finite element analysis: A numerical approach and validated by experiment," *Hybrid Advances*, vol. 6, p. 100239, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.HYBADV.2024.100239.
- [20] S. Ekbatani, Y. Wang, S. Huo, D. Papageorgiou, and H. Zhang, "Nano-engineered hierarchical natural fibre composites with localised cellulose nanocrystals and tailored interphase for improved mechanical properties," *Compos Sci Technol*, vol. 255, p. 110719, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2024.110719.
- [21] M. M. S. Ridha, "Combined effect of natural fibre and steel fibre on the thermal-mechanical properties of UHPC subjected to high temperature," *Cem Concr Res*, vol. 180, p. 107510, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2024.107510.
- [22] A. K. Gurjar, S. M. Kulkarni, S. Joladarashi, and S. Doddamani, "Investigation of mechanical properties of luffa fibre reinforced natural rubber composites: Implications of process parameters," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 4232–

- 4244, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.JMRT.2024.02.133.
- [23] A. Rajkohila, S. Prakash Chandar, and Panruti thangaraj ravichandran, “Assessing the effect of natural fiber on mechanical properties and microstructural characteristics of high strength concrete,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 15, no. 5, p. 102666, May 2024, doi: 10.1016/J.ASEJ.2024.102666.
- [24] Y. Yi Xuan *et al.*, “Influence of multi-walled carbon nanotubes on thermal behaviour and mechanical properties of pineapple leaf fibre-based natural rubber composites,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, pp. 8608–8619, May 2024, doi: 10.1016/J.JMRT.2024.05.239.
- [25] J. R. H *et al.*, “Effect of chemical treatment on physio-mechanical properties of lignocellulose natural fiber extracted from the bark of careya arborea tree,” *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e26706, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.HELİYON.2024.E26706.