

Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de paneles reforzados con fibras de caña brava

Evaluation of the physical and mechanical properties of caña brava (*Arundo donax*) reinforced panels

DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.06>

Artículo de investigación científica. Fecha de recepción: 04/12/2017. Fecha de aceptación: 02/03/2018.

Jonathan Monsalve 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia).
u1101895@unimilitar.edu.co

Martha L. Sánchez 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia).
martha.sanchez@unimilitar.edu.co

David Baquero 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá (Colombia).
u1101844@unimilitar.edu.co

Para citar este artículo:

J. Monsalve, M. L. Sánchez y D. Baquero, "Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de paneles reforzados con fibras de caña brava", *INGE CUC*, vol. 14, no. 1, pp. 66-74, 2018. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.06>

Resumen

Introducción– Actualmente, el uso de compuestos elaborados con materiales de origen vegetal ha ganado importancia en diversas áreas de la ingeniería, fundamentalmente en la construcción civil.

Objetivo– El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento físico y mecánico de paneles elaborados con fibras de caña brava y resina vegetal.

Metodología– Para la elaboración de los paneles, las fibras fueron extraídas usando un triturador mecánico. Las fibras fueron tratadas con solución de hidróxido de sodio. La eficacia del tratamiento químico se evaluó mediante microscopía electrónica de barrido. La rugosidad de las fibras se determinó usando la técnica de microscopía de fuerza atómica. Para la elaboración del compuesto, se utilizó el método de compresión. La caracterización física de los paneles se centró en la evaluación de la absorción efectiva, la densidad y el porcentaje de hinchamiento. Para evaluar el comportamiento mecánico, se llevaron a cabo pruebas de flexión estática y fractura mecánica. El análisis de la degradación del material se llevó a cabo utilizando pruebas de termogravimetría.

Resultados– A partir de los resultados obtenidos, es posible verificar que los paneles elaborados con fibras de caña brava y resina vegetal pueden presentar un incremento en su estabilidad dimensional cuando se comparan con paneles elaborados con fibras de guadua *Angustifolia Kunth*, y, asimismo, muestran mayores valores de resistencia y rigidez que los paneles elaborados con fibras de coco y bambú.

Conclusiones– Considerando que la caña brava es una planta invasiva, su aplicación como refuerzo de paneles compuestos resulta una opción viable para impulsar el desarrollo y aplicación de nuevos materiales en la construcción civil.

Palabras clave– Materiales compuestos; fibras vegetales; caña brava; propiedades físicas; humedad; absorción; densidad; propiedades mecánicas; flexión estática; fractura

Abstract

Introduction– The use of composites made of vegetable origin materials has gained importance in some areas of engineering, mainly in civil construction.

Objective– The objective of this paper is to analyze the physical and mechanical behavior of panels made with caña brava fibers and vegetal resin.

Methodology– For the elaboration of the panels, the fibers were extracted using a mechanical crusher. The fibers were treated with a sodium hydroxide solution. The effect of the chemical treatment was evaluated by scanning electron microscopy. The roughness of the fibers was determined using the atomic force microscopy technique. For the manufacture of the composite, a compression method was used. The physical characterization of the panels was focused on the evaluation of the effective absorption, density, and percentage of swelling. To evaluate the mechanical behavior, static bending and mechanical fracture tests were performed. To evaluate the degradation of the material with the temperature, a thermogravimetric test was executed.

Results– From the results, it is possible to verify that panels made with caña brava fibers and vegetal resin can present an increase in their dimensional stability when compared to panels made with *Guadua Angustifolia Kunth* fibers and show higher values of strength and stiffness than panels elaborated with coconut and bamboo fibers.

Conclusions– Considering that caña brava is an invasive plant, its application as reinforcement of composite panels is a viable option to promote the development and application of new materials in civil construction.

Keywords– Composite materials; vegetal fibers; caña brava; physical properties; humidity; absorption; density; mechanical properties; static bending; fracture

I. INTRODUCCIÓN

El empleo de fibras vegetales como refuerzo de materiales compuestos se ha incrementado en los últimos años. Además de su amplia disponibilidad, las fibras vegetales son renovables y biodegradables, lo cual contribuye a reducir el impacto ambiental generado por el uso de fibras sintéticas. Desde el punto de vista físico, su baja densidad y sus propiedades aislantes permiten la obtención de compuestos de baja densidad y buena durabilidad. Adicionalmente, su resistencia y rigidez son comparables a las de fibras frecuentemente empleadas como refuerzo en compuestos de matrices termoestables y termoplásticas, mostrando buena resistencia ante diferentes condiciones de carga, por lo que su empleo como refuerzo permite la obtención de elementos estructurales de buen desempeño mecánico [1]-[3].

A pesar de sus múltiples ventajas, las fibras de origen vegetal casi siempre poseen poca compatibilidad con las resinas poliméricas que son empleadas como matriz en la elaboración de compuestos, lo cual puede provocar problemas durante el proceso de manufactura. Estos problemas pueden ser asociados a la poca capacidad de impregnación de las fibras, lo cual ocasiona baja adherencia y tiene como consecuencia la generación de una interfase débil que perjudica la transmisión de los esfuerzos que ocurren en el material [4]-[7].

Debido a su composición química, las fibras vegetales presentan un carácter hidrófilo que las hace susceptibles a la absorción de humedad y ocasiona cambios dimensionales en el material, debilitando la interfase fibra-matriz y provocando deterioro prematuro en el compuesto, lo cual limita su empleo en condiciones húmedas [8]. La modificación de la superficie de las fibras permite, no solo reducir su capacidad de absorción, sino también acondicionar su superficie, aumentando su rugosidad y proporcionando una mejor adhesión con la matriz del compuesto [9]. Resultados presentados recientemente muestran que con la realización de tratamientos químicos es posible modificar las propiedades de las fibras, lo cual contribuye a incrementar la resistencia, rigidez y durabilidad de compuestos elaborados con este tipo de material [10]-[18].

En este trabajo se presenta la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de paneles elaborados con fibras aleatoriamente distribuidas de caña brava y resina de origen vegetal.

De esta forma, las fibras fueron obtenidas por medio de un sistema mecánico. Asimismo, para la modificación de la superficie de las fibras, se aplicó un método de tratamiento químico y para la elaboración de los paneles se empleó el método de moldeo manual y compactación por compresión a temperatura ambiente. La determinación de las propiedades físicas se centró en la realización de ensayos de absorción, densidad y porcentaje de hinchamiento.

Para evaluar el desempeño mecánico del material fueron desarrollados ensayos de flexión estática y fractura mecánica en modo II. Los resultados obtenidos fueron comparados con resultados reportados en la literatura especializada para compuestos elaborados con materiales naturales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la elaboración de los paneles fueron utilizadas fibras que fueron extraídas de la parte superior de culmos de caña brava procedente del Valle de Tenza, Boyacá, Colombia. Se utilizaron cañas con una edad promedio de 18 meses, inmunizadas mediante un proceso de inmersión en solución de ácido bórico y bórax, de acuerdo a las recomendaciones de la norma técnica colombiana NTC 5301 [19].

El material utilizado como resina es un poliuretano de origen vegetal obtenido a partir del procesamiento del aceite de una planta conocida con el nombre de *Ricinus comunis* [20]. Esta resina es conformada a partir de la mezcla de dos componentes: un prepolímero y un polioli. La combinación de estos componentes a temperatura ambiente permite la obtención de un polímero de buena estabilidad físico-química, elasticidad e impermeabilidad. Las propiedades de la resina fueron proporcionadas por su proveedor y son presentadas en la Tabla 1.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LA RESINA VEGETAL.

Propiedades	Pre-polímero	Polioli
Punto de ebullición	190 °C	313 °C
Punto de fusión	-14 °C	-10 °C
Punto de inflamabilidad	200°C	229 °C
Densidad	1.22	0.98

Fuente: Autores.

Para la modificación de la superficie de las fibras, se realizó un tratamiento químico. Este tratamiento consistió en la inmersión de tiras de 2 cm de ancho y 1 m de longitud en una solución de hidróxido de sodio con una concentración del 10% por un periodo de 48 horas. A este proceso le siguió un lavado con agua destilada y secado a temperatura ambiente hasta alcanzar masa constante [21].

Para la extracción de las fibras fue utilizado un triturador mecánico elaborado por la empresa MAQUILAB. El equipo consta de un sistema de rodillos acoplados a un motorreductor con una velocidad de rotación de 120 rpm, posibilitando la separación de haces de fibras de 20 cm de longitud, las cuales fueron cortadas con guillotina para la obtención de fibras de hasta 1,5 cm de longitud. La Fig. 1 muestra el triturador empleado.



Fig. 1. Sistema de trituración empleado para la obtención de fibras.
Fuente: Autores.

La determinación de la masa de los materiales constituyentes se efectuó tomando como referencia el volumen de un molde de acero de 300 x 300 x 5,5 mm. Se seleccionó una proporción de mezcla igual a 70/30 (fibra/matriz). Para determinar la masa de fibras y de resina, se emplearon los valores de densidad promedio de las fibras, determinada de forma experimental de acuerdo con las recomendaciones de la ASTM 3800-16 [22] y los valores de densidad relativa suministrados por el proveedor de los dos componentes que conforman la resina vegetal presentados en la Tabla 1. Para establecer la proporción de mezcla de la resina se seleccionó, a sugerencia de su proveedor, el empleo de una relación 1:1,5 (pre-polímero-poliol). El empleo de esta proporción permite un periodo para trabajarla de aproximadamente 15 minutos antes de que se inicie el proceso de fraguado.

La elaboración de los paneles incluyó el método de moldeo manual y compactación por prensado a temperatura ambiente. Este procedimiento consiste en colocar sobre el molde capas sucesivas de fibras aleatoriamente distribuidas, realizando la impregnación de la resina de tal forma que la superficie de las fibras quede totalmente cubierta por el poliuretano. Para el prensado de los paneles, se empleó una prensa hidráulica provista de un marco de ensayo de alta rigidez conformado por cuatro columnas con capacidad de 100 toneladas, un indicador digital, un transductor de presión de 70 MPa y una bomba manual.

En todos los paneles se aplicó una precarga de 0,07 toneladas para eliminar el aire atrapado. La carga de prensado fue de 18 toneladas. El tiempo de prensado fue seleccionado de acuerdo con las recomendaciones del proveedor de la resina vegetal, estableciéndose un tiempo de 18 horas. El proceso de moldeo manual del compuesto se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2. Moldeo manual de paneles.
Fuente: Autores.

Para la caracterización física de las fibras se adoptó la metodología propuesta por Moreno et al [20]. El número de probetas fue determinado en función de los recursos y equipos disponibles en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Universidad Militar Nueva Granada. La validación de los resultados fue realizada por medio de la determinación de la desviación estándar. Para la determinación de las propiedades físicas de las fibras se emplearon 10 haces de fibras formados por fibras de 5 cm de longitud. El contenido de humedad, la densidad relativa y la absorción efectiva fueron determinadas de acuerdo con las recomendaciones de las ASTM D3800-16 [22] ASTM D5229-14 [23].

La evaluación de las propiedades físicas de los paneles consistió en la determinación de la densidad y la absorción efectiva en 2 h y 24 h, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM D-2395-14 [24] y ASTM D4442-16 [25]. El porcentaje de hinchamiento fue determinado a partir de la variación de espesor de probetas cuadradas de 50 mm de ancho después de haber sido sumergidas en agua durante un periodo de 2 y 24 horas.

La evaluación de las propiedades mecánicas estuvo enfocada en la determinación experimental de la resistencia a flexión estática y de la resistencia a fractura en modo II. Los ensayos de flexión estática se realizaron en 25 probetas de 75 mm de ancho, 5,5 mm de espesor y una luz libre igual a 24 veces el espesor del panel. La velocidad de aplicación de la carga fue de 3 mm/min. El montaje del ensayo se muestra en la Fig. 3.



Fig. 3. Ensayo de flexión estática.
Fuente: Autores.

Para la realización de los ensayos de fractura fueron diseñadas 25 probetas de 150 mm de longitud y 30 mm de ancho a las cuales se les diseñó un entalle de 75 mm de longitud y 6 mm de espesor a lo largo del eje longitudinal de la probeta. Siguiendo el procedimiento descrito por Yoshihara [26], se adoptó un ensayo de flexión en tres puntos excéntricos para analizar el modo II de fractura mecánico, aplicando la carga a una distancia $L/4$ de los apoyos (Fig. 4). Al inducir un entalle en la dirección longitudinal de la pieza es posible estimar la delaminación que le ocurre al elemento debido a la acción de una fuerza perpendicular a la superficie de falla. Para la realización de los ensayos se utilizó una prensa MTS Landmark 370.10 con un rango de operación de hasta 10 toneladas. La carga se aplicó a una velocidad de 1 mm/min. El tiempo total de prueba fue de aproximadamente 10 minutos para cada probeta.



Fig. 4. Montaje para ensayo de fractura en modo II.
Fuente: Autores.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para analizar la eficiencia del tratamiento químico fueron capturadas imágenes por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido utilizando un microscopio JEOL NeoScope JCM-5000. Los resultados son presentados en las figuras 5 y 6.

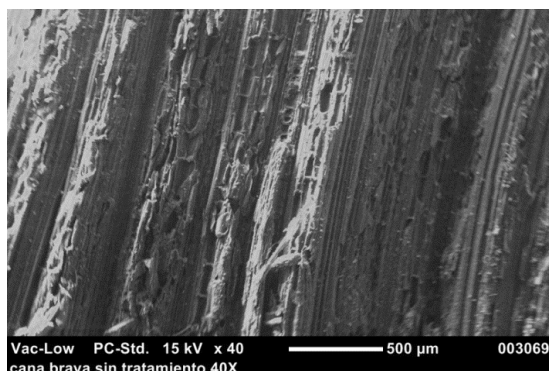


Fig. 5. Micrografía de caña brava sin tratamiento.
Fuente: Autores.

A partir de las figuras 5 y 6, es posible notar que con la realización de un tratamiento alcalino es posible la limpieza y remoción parcial de la lignina, así como de algunas sustancias extraíbles, aceites y ceras adheridas a la superficie de las fibras. Una vez realizado el tratamiento, se observa la mayor definición de las microfibras de celulosa, lo cual contribuye a una mejor impregnación de la resina durante la manufactura de los paneles.

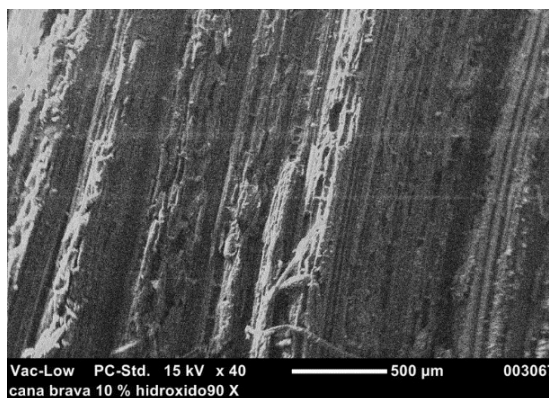


Fig. 6. Micrografía de caña brava con tratamiento.
Fuente: Autores.

La topografía de las fibras después del tratamiento químico fue observada mediante la técnica de microscopía de fuerza atómica utilizando probetas de $50 \times 50 \mu\text{m}$. Los resultados son presentados en las figuras 7 y 8.

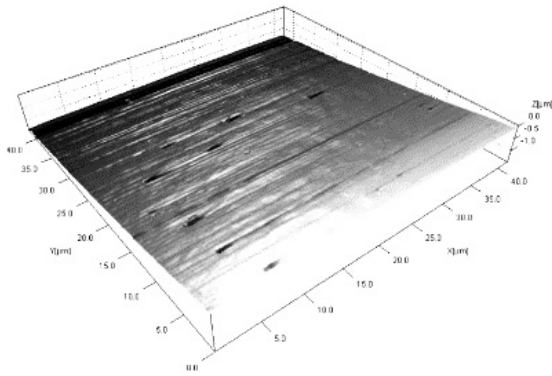


Fig. 7. Topografía de fibras de caña brava sin tratamiento.
Fuente: Autores.

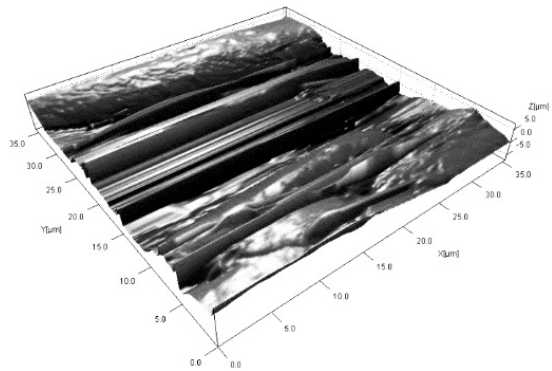


Fig. 8. Topografía de fibras de caña brava con tratamiento.
Fuente: Autores.

Los resultados presentados en las figuras 7 y 8 permiten comprobar que con el tratamiento alcalino es posible la reducción del contenido de lignina, hemicelulosa, ceras y pectinas que permanecen adheridas a la superficie de las fibras después del proceso de extracción. La eliminación de estas sustancias permite una mejor definición de las microfibras (Fig. 6) y un incremento significativo en la rugosidad de las fibras de caña brava. Este aumento de rugosidad contribuye al fortalecimiento de la interfase fibra-matriz, y, por lo tanto, a una mejor transferencia de esfuerzos durante la etapa de realización de los ensayos mecánicos.

Con el objetivo de verificar el efecto del tratamiento alcalino en las propiedades físicas de las fibras, la absorción efectiva y el contenido de humedad fueron determinados. Los resultados son presentados en la Fig. 9.

A partir de los resultados presentados en la Fig. 9, puede notarse que, con la modificación de la superficie de las fibras, la absorción efectiva de las fibras no se vio afectada con el tratamiento aplicado. Igualmente, al analizar la densidad de las mismas, una reducción de aproximadamente un 5% pudo ser percibida, presentándose una densidad promedio para fibras tratadas igual a $0,59 \pm 0,01$ g/cm³. La

determinación de la densidad incide, no solo en la dosificación de los materiales constituyentes durante el proceso de manufactura de los paneles, sino también en el peso propio del elemento.

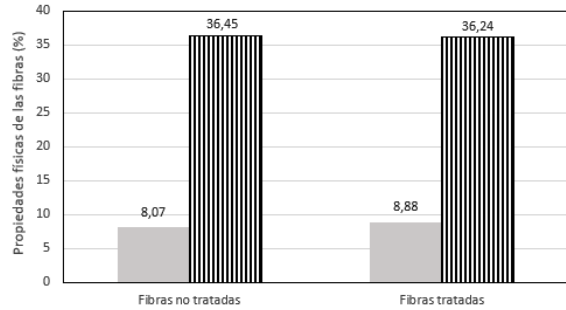


Fig. 9. Propiedades físicas de las fibras.
Fuente: Autores.

La determinación de las propiedades físicas de los paneles fue basada en la determinación de la absorción efectiva y el porcentaje de hinchamiento en 2 y 24 horas para paneles con densidad promedio de $1,02 \pm 0,06$ g/cm³. Los resultados son presentados en la Fig. 10. Los resultados obtenidos pueden ser comparados con los obtenidos para paneles elaborados con fibras de bambú de la especie *Guadua Angustifolia Kunth* (GAK). La comparación se muestra en la Tabla 2.

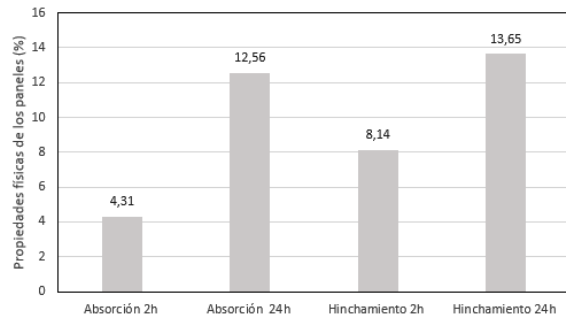


Fig. 10. Propiedades físicas de paneles.
Fuente: Autores.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 2, es posible observar que los paneles elaborados con fibras de caña brava presentan valores significativamente inferiores de hinchamiento y absorción efectiva. A pesar de los bajos porcentajes de hinchamiento obtenidos para los dos tipos de paneles evaluados, los paneles elaborados con fibras de *Guadua Angustifolia Kunth* presentaron una mayor susceptibilidad a la ocurrencia de cambios dimensionales al estar en contacto con el agua por un periodo de 24 horas (25%) y una mayor capacidad de absorción (13,52%). Una diferencia de aproximadamente un 60% del valor del porcentaje de hinchamiento fue observada al comparar los paneles elaborados en las mismas condiciones.

Esta diferencia de resultados permite demostrar la influencia del tipo de fibra en las propiedades físicas de compuestos reforzados con materiales de origen vegetal y puede estar asociada a los contenidos de lignina, hemicelulosa, ceras y otras sustancias extraíbles presentes en las fibras en su estado natural y que son removidas en diferentes proporciones con los tratamientos de modificación superficial. Resultados similares fueron obtenidos por Sanchez et al [21] y permiten comprobar que otros parámetros, como son el tiempo de tratamiento, concentración y temperatura a la cual se realiza el tratamiento alcalino, puede incidir notablemente en la limpieza de las fibras, afectando su hidrofobicidad, y, por tanto, la estabilidad dimensional y capacidad de absorción del compuesto.

TABLA 2. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

Propiedad física	Fibras de caña brava	GAK
Hinchamiento 2h (%)	2,7 ± 0,1	10,8 ± 0,7
Hinchamiento 24h (%)	8,4 ± 0,4	25,0 ± 0,2
Absorción 2h (%)	4,3 ± 0,1	7,7 ± 0,1
Absorción 24h (%)	12,6 ± 0,1	13,5 ± 0,1

Fuente: Autores.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de los paneles se determinaron el módulo de rotura (MOR) y el módulo de elasticidad a flexión (MOE), de acuerdo con las especificaciones de la ASTM 1037-12 [27]. Los resultados fueron comparados con resultados presentados en la literatura técnica para paneles elaborados con fibras de bagazo de caña [28] y fibras de coco [29], y se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.

Propiedad	Caña brava	Bambú [28]	Coco [29]
MOR (MPa)	43,6 ± 0,2	22,6 ± 1,1	17,9 ± 1,3
E (GPa)	3,6 ± 0,4	2,9 ± 0,9	1,4 ± 0,5

Fuente: Autores.

Analizando los resultados presentados en la Tabla 3, es posible notar que los valores del módulo de rotura obtenidos para los paneles elaborados con fibras de caña brava son más altos que los obtenidos para paneles elaborados con otras fibras vegetales en similares condiciones de elaboración. Los paneles mostraron un incremento de hasta un 60% en el valor del módulo de rotura y en el módulo de elasticidad a flexión al ser comparados con paneles elaborados con fibras de coco, y una ganancia de resistencia de

aproximadamente un 40% al ser comparados con paneles elaborados con fibras de bambú de la especie *Guadua Angustifolia* Kunth. Las diferencias encontradas para paneles elaborados con diferentes fibras vegetales pueden ser asociadas no solo a la rugosidad de las fibras sino también a la dosificación de materiales constituyentes, la relación diámetro/longitud y los métodos de moldeo y compactación empleados en la manufactura del compuesto.

Con el objetivo de evaluar la resistencia a fractura mecánica en modo II, se desarrolló un ensayo de flexión asimétrica en tres puntos. La forma de falla de las probetas y el gráfico de carga vs deformación son presentados en las figuras 11 y 12.

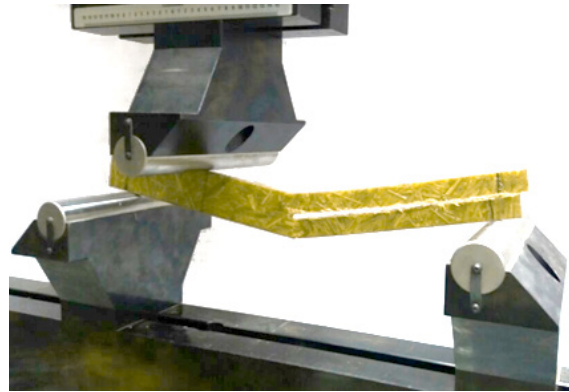


Fig. 11. Ensayo de fractura mecánica en modo II.
Fuente: Autores.

La determinación de la resistencia máxima a fractura se estableció de acuerdo con (1):

Donde:

P es la carga máxima en N,

$2L$ es la longitud de la probeta en mm,

a es la longitud del entalle en mm,

b es el ancho del entalle en mm,

c es la distancia desde el punto de aplicación de la carga al apoyo en mm,

h es el espesor de la probeta en mm

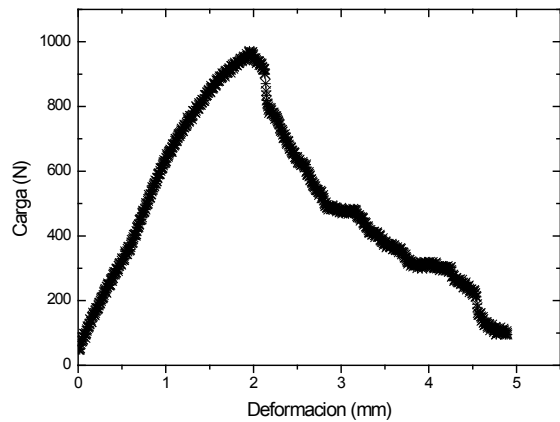


Fig. 12. Gráfico de carga vs deformación.
Fuente: Autores.

A partir del gráfico presentado en la Fig. 12, es posible percibir una carga máxima promedio de 940 N obtenida durante el ensayo de fractura mecánica en modo II. La carga obtenida equivale a una resistencia máxima de fractura de 20,41 MPa. Una vez alcanzado este valor, la fisura comienza a propagarse rápidamente hasta alcanzar la falla. Resultados similares fueron obtenidos por Yoshihara [26] al analizar el comportamiento de probetas de madera.

Para analizar la degradación de los paneles con la temperatura, se realizó un análisis termogravimétrico. Para el análisis fue utilizado un equipo SDT-Q600 de TA Instruments en una atmósfera de nitrógeno inerte con un flujo de 100 ml/min. El análisis se desarrolló en muestras de 10 mg. Las muestras fueron pulverizadas mediante el uso de una lima de metal y un rallador. Los resultados son presentados en la Fig. 13.

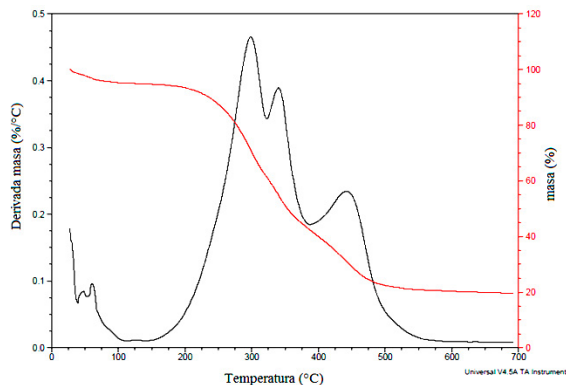


Fig. 13. Degradación del material con la temperatura.
Fuente: Autores.

A partir de la Fig. 13, se pueden observar varias fases de descomposición:

- Fase 1: pérdidas de masa a temperaturas por debajo de 100°C pueden ser atribuidas a la pérdida de humedad del compuesto.
- Fase 2: pérdidas de masa entre los 100°C y 200°C pueden ser asociadas a la descomposición de la hemicelulosa presente en las fibras que actúan como refuerzo [30].
- Fase 3: pérdidas de masa entre 200°C y 415°C pueden ser asociadas a la descomposición de la resina vegetal.
- Fase 4: pérdidas de masa entre 360°C y 420°C pueden ocurrir debido a la descomposición de la celulosa [30].

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una metodología para la fabricación y caracterización de paneles elaborados con fibras de caña brava y resina vegetal.

Los resultados presentados permiten demostrar el efecto del tratamiento químico en el aumento de la rugosidad de la superficie de las fibras, lo cual contribuye a una mejor capacidad de impregnación de las mismas durante el proceso de elaboración del compuesto.

Los bajos valores de absorción y la buena estabilidad dimensional son parámetros que inciden favorablemente en el desempeño de los paneles y promueven su aplicación, fundamentalmente cuando el material esté sometido a condiciones de humedad por largos periodos de tiempo. Adicionalmente, los resultados obtenidos en la caracterización mecánica denotan el buen desempeño de paneles elaborados con fibras vegetales y promueven el uso de fibras vegetales como sustitutas de fibras tradicionalmente empleadas en la elaboración de compuestos poliméricos de aplicación en ingeniería civil.

A partir de los resultados obtenidos, es posible verificar que los paneles elaborados con fibras de caña brava y resina vegetal pueden presentar un incremento en su estabilidad dimensional cuando se comparan con paneles elaborados con fibras de Guadua Angustifolia Kunth, y muestran mayores valores de resistencia y rigidez que aquellos paneles elaborados con fibras de coco y bambú. Teniendo en consideración que la caña brava es considerada una planta invasiva, su aplicación como refuerzo de paneles compuestos resulta una opción viable para impulsar el desarrollo y aplicación de nuevos materiales en la construcción civil.

V. RECOMENDACIONES

En este trabajo se presentan resultados de la caracterización física y mecánica de paneles elaborados con fibras de caña brava y resina vegetal, utilizando fibras aleatoriamente distribuidas tratadas con solución de hidróxido de sodio. No obstante, para profundizar en el estudio de este tipo de compuesto, es necesario evaluar el efecto de otros parámetros, como son el tamaño y la orientación de las fibras, los métodos de modificación superficial y el efecto de los procesos de moldeo y compactación, los cuales deberán ser analizados en trabajos futuros.

VI. FINANCIACIÓN

Este artículo es un producto derivado del proyecto INV-ING-2392, financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada- vigencia (2017).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Militar Nueva Granada, la cual posibilitó la realización de este trabajo por medio del proyecto de investigación con código de trazabilidad INV-ING-2392, vigencia 2017.

REFERENCIAS

- [1] Pickering K, *Properties and performance of natural-fibre composites*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008, pp. 576.
- [2] J. Summerscales, N. Dissanayake, A. Virk y W. Hall, "A review of bast fibres and their composites. Part 1- Fibres as reinforcements. Composites Part A," vol. 41, no. 10, pp. 1329-1335, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.001>
- [3] J. Summerscales, N. Dissanayake, A. Virk y W. Hall, "A review of bast fibres and their composites. Part 2- Composites. Composites Part A," vol. 41, no. 10, pp. 1336-1344, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.05.020>
- [4] S. Thomas, S. A. Paul, L. A. Pothan y B. Deepa, "Natural Fibres: Structure, Properties and Applications, Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites," en S. Kalia et al. (eds.), 2011, pp. 720.
- [5] T. Lu, M. Jiang, Z. Jiang, D. Hui, Z. Wang y Z. Zhou, "Effect of surface modification of bamboo cellulose fibers on mechanical properties of cellulose/epoxy composites," *Compos Part B:Eng.*, vol. 51, pp. 28-34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.02.031>
- [6] L. Dányádi, J. Móczó y B. Pukánszky, "Effect of various surface modifications of wood flour on the properties of PP/wood composites," *Composite Part A: Appl. Sci. Manufact.*, vol. 41, no. 2, pp. 199-206, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.008>
- [7] G. Cantero, A. Arbeliaz, R. Liano-Ponte y I. Mondragon, "Effects of fibre treatment on wettability and mechanical behavior of flax/polypropylene composites," *Composite Science and Technology*, vol. 63, no. 9, pp. 1247-1254, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00094-0)
- [8] H. Alamri e I. M. Low, "Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites," *Polymer Testing*, vol. 31, no. 5, pp. 620-628, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.04.002>
- [9] X. Yanjun, A. S. H. Callum, X. Zefang, M. Holger, M. Carsten, "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review," *Composites Part A*, vol. 41, no. 7, pp. 806-819, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- [10] J. Rout, S. S. Tripathy, S. K. Nayak, M. Misra y A. K. Mohanty, "Scanning electron microscopy study of chemically modified coir fibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 79, pp. 1169-1177, 2001. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010214\)79:7%3C1169::AID-APP30%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010214)79:7%3C1169::AID-APP30%3E3.0.CO;2-Q)
- [11] A. I. S. Brígida, V. M. A. Calado, L. R. B. Gonçalves y M. A. Z. Coelho, "Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber," *Carbohydr Polym*, vol. 79, no. 4, pp. 832-838, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.005>
- [12] M. Rokbi, H. Osmania, A. Imad y N. Benseddq, "Effect of Chemical Treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite," *Procedia Eng*, vol. 10, pp. 2092-2097, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.346>
- [13] M. N. Akhtara, A. B. Sulong, M. K. Fadzly Radzi, N. F. Ismail, M. R. Raza, N. Muhamad y M. A. Khan, "Influence of alkaline treatment and fiber loading on the physical and mechanical properties of kenaf/polypropylene composites for variety of applications," *Prog. Nat. Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 657-664, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.004>
- [14] A. Orue, A. Jauregi, U. Unsuain, J. Labidi, A. Eceiza y A. Arbelaz, "The effect of alkaline and silane treatments on mechanical properties and breakage of sisal fibers and poly(lactic acid)/sisal fiber composites," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, vol. 84, pp.186-195, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.01.021>
- [15] V. Fiore, G. Di Bella y A. Valenza, "The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites," *Compos Part B: Eng.*, vol. 68, pp. 14-21, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025>
- [16] M. J. John y R. D. Anandjiwala, "Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites," *Polymer Composites*, vol. 29, pp. 187-207, 2008. <https://doi.org/10.1002/pc.20461>
- [17] A. K. Mohanty, M. Misra y L. T. Drzal, "Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview," *Composite Interfaces*, vol. 8, no. 5, pp. 313-343, 2001. <https://doi.org/10.1163/156855401753255422>
- [18] F. P. La Mantia y M. Morreale, "Green composites: A brief review," *Composites Part A*, vol. 42, no. 6, pp. 579-588, 2001. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>
- [19] Norma Técnica Colombiana - NTC 5301, *Preservación y Secado del culmo de Guadua Angustifolia Kunth*. Bogotá: Editorial Icontec, 2007
- [20] A. H. Grigoriou y G. A. Ntalos, "The potential use of Ricinus communis L. (Castor) stalks as a lignocellulosic resource for particle boards," *Industrial Crops and Products*, vol. 13, no. 3, pp. 209-218, 2001.
- [21] M. L. Sanchez, L. Y. Morales y J. D. Caicedo, "Physical and mechanical properties of agglomerated panels made from bamboo fiber and vegetable resin," *Construction and Building Materials*, vol. 156, no. 15, pp. 330-339, 2017.
- [22] American Society for Testing and Materials, ASTM, *D3800-16. Standard test method for density of high-modulus fibers*. Philadelphia: ASTM, 2016.
- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM, *D5229-14. Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials*. Philadelphia: ASTM, 2014.
- [24] American Society for Testing and Materials, ASTM, *D2395-14. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials*. Annual Book of ASTM Standards, 2014.
- [25] American Society for Testing and Materials, ASTM, *D 4442-16. Standard test method for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials*. Philadelphia: ASTM, 2016.
- [26] H. Yoshihara, "Mode II fracture mechanics properties of solid wood measured by the three-point eccentric end-notched flexure test," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 141, pp. 140-151, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.05.028>
- [27] American Society for Testing and Materials, ASTM, *D1037-12 Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials*. Philadelphia: ASTM, 2012.
- [28] J. Fiorelli, F. A. R. Lahar, M. F. do Nascimento, H. Savastano y J. A. Rossignolo, "Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades," *Acta Scientiarum Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 401-406, 2011. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9615>
- [29] J. Fiorelli, D. Donizzetti, N. Barrero, H. Savastano, E. M. Agnolon y R. Johnson, "Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product," *Industrial Crops and Products*, vol. 40, pp. 69-75, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.033>
- [30] H. S. Kim, H. S. Yang y H. J. Kim, "Thermogravimetric analysis of rice husk flour filled thermoplastic polymer composites," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 76, no. 2, pp. 395-404, 2004.

Jonathan Monsalve Alarcón es ingeniero civil graduado de la Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá, Colombia). <https://orcid.org/0000-0003-1738-7312>

Martha Lissette Sánchez Cruz es ingeniera hidráulica y civil del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana, Cuba. Magister en Estructuras de la Pontificia Universidade Católica Do Rio De Janeiro. Doctora en Ingeniería por el Instituto Tecnológico de Aeronautica de São José dos Campos en Brasil. Profesora asistente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá, Colombia). <https://orcid.org/0000-0002-4718-0569>

David Esteban Baquero Basto es ingeniero civil graduado de la Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá, Colombia). <https://orcid.org/0000-0003-4472-5620>