Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.02
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente

Effect of process variable on the mechanical and thermal behavior of a polypropylene composite reinforced with short bamboo fibers by hot compression

Leidy Quintero[1], Alexis García[2], Alejandro Alcaraz[1], Jorge Fajardo[3], Luis Cruz[1,*]

Recibido: 12-05-2023, Recibido tras revisión: 17-03-2025, Aceptado: 26-03-2025, Publicado: 01-07-2025

Resumen

En este trabajo se estudió el efecto de la concentración del refuerzo y del agente de acople en el comportamiento mecánico y térmico de un material compuesto, procesado mediante la técnica de moldeo por compresión en caliente (MCC), a partir de una matriz de polipropileno (PP) modificada con anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP) y reforzada con fibras cortas de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (GAK). Las fibras fueron extraídas previamente mediante la técnica de *steam explosion*. La investigación se desarrolló en dos etapas. En la primera, se elaboraron los materiales compuestos poliméricos y, en la segunda, se realizó la caracterización mecánica y térmica de los mismos. La adición de las fibras de GAK y del agente de acople (MAPP) al polipropileno, modificó el comportamiento mecánico de la matriz, obteniéndose materiales más rígidos, con una mayor resistencia a la flexión y mayor absorción de la energía de impacto. La mejor configuración del material compuesto fue con el 50 % p/p de fibras de GAK y el 4 % p/p de MAPP, lo que permitió obtener un incremento sustancial en el módulo de elasticidad del 322 % (2,9 GPa) en relación con el PP virgen (0,7 GPa). Ambos factores tuvieron un efecto significativo en el comportamiento mecánico del *composite.*

Palabras clave: fibras naturales, bambú, *composites* poliméricos, compresión en caliente, caracterización mecánica, caracterización térmica

Abstract

This study investigates the effect of fiber content and coupling agent concentration on the mechanical and thermal behavior of a polypropylene-based composite. The materials were fabricated via hot compression molding using pellets composed of polypropylene (PP) modified with maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) and reinforced with short bamboo fibers derived from *Guadua angustifolia* Kunth (GAK). The fibers were previously extracted through the steam explosion technique. The research was carried out in two stages: first, the composite materials were produced; second, their mechanical and thermal properties were comprehensively characterized. The incorporation of GAK fibers and MAPP significantly altered the mechanical performance of the PP matrix, yielding stiffer composites with improved flexural strength and impact resistance. The optimal formulation, containing 50 wt% GAK fibers and 4 wt% MAPP, resulted in a 322% increase in elastic modulus (2.9 GPa) compared to neat polypropylene (0.7 GPa). Both variables, fiber content and compatibilizer concentration, were found to exert a substantial influence on the mechanical behavior of the resulting composites.

Keywords: Natural fibers, bamboo, polymeric composites, hot compression, mechanical characterization, thermal characterization

[1,*]Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
Autor para correspondencia ✉: luis.cruz@upb.edu.co.

[2]Centro de diseño y manufactura del cuero - SENA, Colombia.

[3]Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Forma sugerida de citación: L. Quintero, A. García, A. Alcaraz, J. Fajardo y L. Cruz, "Efecto de variables de proceso en el comportamiento mecánico y térmico de un composite de polipropileno reforzado con fibras cortas de bambú por compresión en caliente," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.° 34, pp. 20-30, 2025. DOI: https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.02.

1. Introducción

En las últimas décadas, las fibras naturales, como el kenaf, el yute y el cáñamo, han recibido atención al considerarse una opción de origen renovable para la elaboración de materiales compuestos biobasados. Esto se debe a que pueden reemplazar en gran medida el uso de recursos no biodegradables y de difícil disposición final en la fabricación de componentes funcionales, en los cuales las características más deseadas son la rigidez y la ligereza [1].

Estas fibras de origen natural presentan numerosas ventajas, entre las cuales se incluyen su bajo costo, menor consumo energético durante su producción, abundancia, renovabilidad, no toxicidad, baja densidad y altas propiedades mecánicas específicas, similares a las de la fibra de vidrio [2,3].

En particular, las fibras naturales de *Guadua angustifolia* Kunth (GAK) representan una alternativa prometedora como refuerzo natural en materiales compuestos, debido a su alta resistencia a la tracción y su elevado módulo de elasticidad. Además, son amigables con el medioambiente y crecen rápidamente, alcanzando su madurez en un periodo de tiempo relativamente corto (aproximadamente tres años) [4–6].

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son adecuados para su procesamiento mediante técnicas de moldeo por extrusión, inyección, termoformado y compresión en caliente. Además, cumplen con los requerimientos técnicos y económicos para la fabricación de piezas funcionales que pueden emplearse en una gran variedad de sectores industriales [7,8].

Sin embargo, existen diversos desafíos para lograr la aceptación de estos materiales a escala masiva, como la heterogeneidad en las propiedades mecánicas de las fibras naturales [6], la sensibilidad al agua [9] y la baja adhesión entre las fibras y la matriz, debido al carácter hidrofóbico de la matriz y al carácter hidrofílico de dichas fibras [10].

Respecto a este último aspecto, es importante mencionar que esta incompatibilidad genera problemas en el procesamiento [5] y, además, disminuye significativamente las propiedades mecánicas del material compuesto [11]. Por lo tanto, se han desarrollado tratamientos químicos, físicos y biológicos que permiten modificar el carácter hidrofílico de las fibras naturales, aumentar su área superficial de contacto y fortalecer la unión interfacial fibra-matriz [12–14]. Asimismo, en los materiales compuestos se han aplicado métodos de esterificación, eterificación y bencilación, además de la adición de compatibilizantes durante los procesos de manufactura. Según la literatura científica, para materiales poliméricos termoplásticos reforzados con fibras naturales cortas, comúnmente se han utilizado como agentes compatibilizantes el anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP), el anhídrido maleico injertado en polietileno (MAPE) y silanos [15].

En la misma línea, [16,17] elaboraron materiales compuestos a partir de polipropileno reforzados con fibras de bambú, aplicando tratamientos superficiales con NaOH y silanos, y con carbonato de calcio, respectivamente, para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales. Los autores reportan un aumento en propiedades como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Igualmente [18,19] proponen tratamientos alcalinos con NaOH y $NaClO_2$ para remover las impurezas presentes en la superficie de las fibras de GAK y mejorar la capacidad del polímero para adherirse sobre ellas. Con este tratamiento, también se incrementó la rugosidad superficial y el porcentaje de cristalinidad de las fibras; además, se redujeron su peso y diámetro.

Por otro lado, Kumar y Das [2] desarrollaron un laminado de material compuesto utilizando una matriz de poliéster insaturado reforzada con fibras de GAK, sugiriendo el empleo de este *composite* en aplicaciones semiestructurales. Se analizaron propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, el módulo de Young, la resistencia a la flexión y el módulo de flexión, concluyendo que todas las propiedades disminuyeron con respecto al material de referencia. Esto se debió a que, en la elaboración del *composite*, no se controló la orientación de la fibra ni se utilizaron agentes de acople para reducir la incompatibilidad entre el carácter hidrofílico de las fibras y el carácter hidrofóbico de la matriz.

Entre los pocos estudios reportados sobre matrices híbridas, se destaca el trabajo de Ying-Chen et al. [20], quienes emplearon la técnica de extrusión para obtener materiales compuestos con una matriz híbrida de polipropileno y ácido poliláctico (PP/PLA) reforzada con fibras de bambú. Utilizaron MAPP como agente de acople para mejorar la interfase fibra-matriz híbrida y examinaron las propiedades morfológicas, térmicas y reológicas de estos materiales.

Los autores determinaron un incremento en dichas propiedades, debido a la buena interacción en la interfase fibra-matriz híbrida por la incorporación del MAPP. Asimismo, reportaron un aumento en la cristalinidad de estos *composites* en comparación con los polímeros no reforzados, atribuido a la adición de fibras naturales.

Como se evidencia en la revisión bibliográfica, el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras cortas es influenciado por una gran cantidad de variables, entre las que se destacan: tipo y contenido de fibra, tipo y contenido del agente de acople, estado de orientación del refuerzo, longitud de las fibras, adhesión entre fibra-matriz y técnica de procesamiento [21].

Vale la pena indicar que en la literatura científica no se encuentran reportes de investigaciones que analicen la elaboración de estos materiales mediante moldeo por compresión en caliente (MCC) ni estudios sobre

el comportamiento de *composites* naturales reforzados con fibras cortas extraídas mediante la técnica de *steam explosion*.

Dado lo anterior, en esta investigación se estudió el efecto de la variación del contenido de fibra y del agente de acople (MAPP) sobre el comportamiento mecánico y térmico de un *composite* elaborado mediante la técnica de MCC, a partir de polipropileno, MAPP y fibras cortas de GAK. Se realizaron ensayos mecánicos (tracción, flexión e impacto) y térmicos (DSC y TGA) y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó la mejor configuración del material compuesto.

2. Materiales y métodos

Como matriz polimérica se utilizaron *pellets* de polipropileno homopolímero HOPELEN H1500, grado inyección, con una densidad de 0,9 g/cm^3 y un índice de fluidez de 12 g/10 min, proporcionados por LOTTE CHEMICAL.

Como material de refuerzo se usaron fibras cortas de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth (GAK) extraídas mediante el equipo de *steam explosion* a severidad de 3,3 [22].

Para la compatibilización entre la fibra y la matriz se emplearon pellets de anhídrido maleico injertado en polipropileno (MAPP), suministrados por la empresa SIGMA-ALDRICH.

2.1. Procesamiento de los materiales compuestos

Las fibras extraídas mediante *steam explosion* se secaron a una temperatura de 105 °C por 2 horas, con el fin de remover la humedad contenida en ellas. Posteriormente, se redujo el tamaño de las muestras utilizando un molino de cuchillas. La velocidad del molino se fijó en 1440 rpm y se empleó una criba de 4 mm para el retenido. El material procesado fue clasificado mediante una tamizadora. Para la elaboración de los materiales compuestos se utilizaron las fibras retenidas en las mallas 60 (250 µm) y 100 (150 µm), conforme con la norma ASTM E11.

Para la elaboración de los materiales compuestos se utilizó la técnica de moldeo por compresión en caliente (MCC), modificando de forma controlada los contenidos de fibra (30 %, 40 % y 50 % p/p) y de MAPP (0 %, 4 % y 8 % p/p), con el fin de determinar la influencia de estas variables en su comportamiento mecánico y térmico. A partir de estos ensayos, se seleccionó la mejor dosificación del *composite*.

Los porcentajes de reforzante y compatibilizante se determinaron con base en la revisión bibliográfica. Estudios como el de [23], sobre fibras de bambú en compuestos de polipropileno, demostraron que la incorporación de fibras en rangos del 30 % al 50 % p/p permite obtener mejoras significativas en las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Asimismo, trabajos como [24] observaron que una mayor carga de fibras de hoja de piña (similares en estructura a las fibras de la GAK) incrementa el módulo de elasticidad, aunque puede comprometer la tenacidad cuando se supera el 50 % p/p.

Por otra parte, estudios como [25] concluyen que el uso de agentes de acoplamiento, como el MAPP, mejora la adhesión interfacial entre la matriz polimérica (PP) y las fibras naturales, aumentando la resistencia mecánica y la estabilidad térmica. En particular, el 4 % p/p de agente de acople ha demostrado ser eficaz para mejorar la adhesión sin provocar efectos adversos en la homogeneidad de la mezcla.

De este modo, se establecieron tres niveles de MAPP para evaluar posibles mejoras o fenómenos de saturación en las propiedades del compuesto.

Antes de la elaboración de las láminas de *composites*, una extrusora tipo monohusillo fue alimentada con las materias primas, previamente mezcladas de forma manual, con el fin de obtener premezclas homogéneas correspondientes a las diferentes dosificaciones del material compuesto.

El perfil de temperaturas en este equipo se distribuyó de la siguiente manera: 170 °C, 180 °C, 190 °C y 200 °C. La velocidad del husillo se fijó en 60 rpm. El extrusor se equipó con un pelletizador de 3 mm de diámetro, y los *pellets* se cortaron en gránulos de 5 mm de longitud promedio.

Posteriormente, los *pellets* fueron prensados mediante MCC en varias etapas, como se detalla en la Figura 1, para obtener placas con dimensiones de 150 × 100 × 3 mm. A partir de dichas placas se obtuvieron las probetas para las diferentes pruebas mecánicas mediante un router CNC.

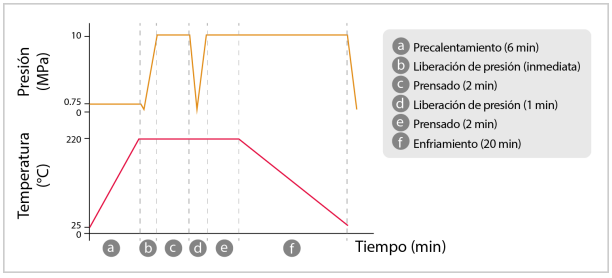

Figura 1. Curvas de temperatura y presión utilizadas en el proceso de moldeo por compresión en caliente

2.1.1. Caracterización mecánica de los materiales compuestos

Se realizaron ensayos de tracción en una máquina universal INSTRON 5582, siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D638-14 con probetas tipo IV, para determinar las propiedades de resistencia

a la tracción, módulo de elasticidad y elongación máxima a la rotura. Para medir la deformación se usó un extensómetro axial Instron de la serie 2630-105, con una longitud de calibración de 25 mm.

Adicionalmente, se analizó cualitativamente la interfaz fibra-matriz de los compuestos luego de ser sometidos a ensayos de tracción, empleando un equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM) modelo JEOL JCM-6000Plus), con un voltaje de 15 kV en condiciones de alto vacío. Para este análisis se utilizó la técnica de recubrimiento por pulverización catódica (*sputtering*).

Los ensayos de flexión a tres puntos fueron realizados en una máquina universal Instron 5582, aplicando el procedimiento A descrito en la norma ASTM D790-10, para calcular las propiedades de resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

Por su parte, los ensayos de impacto se llevaron a cabo en una máquina de ensayos de péndulo tipo Izod, marca SATEC Systems, conforme a la norma ASTM D256-10.

En todos los ensayos se realizaron ocho réplicas para cada una de las dosificaciones de material compuesto.

En cuanto a los ensayos de dureza superficial, estos se llevaron a cabo en un medidor de dureza tipo Shore D, marca Bareiss, con escala análoga de 0-100, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D2240-15. Las muestras fueron previamente acondicionadas en un ambiente con una humedad relativa del 55 % y temperatura de 22 °C durante 40 horas, conforme a lo indicado en la norma ASTM D618-13.

2.1.2. Caracterización térmica de los materiales compuestos

Mediante un calorímetro diferencial de barrido (DSC) se determinaron las propiedades térmicas de los materiales compuestos, tales como la temperatura de fusión, la temperatura de cristalización y las entalpías de fusión y cristalización.

El tamaño de muestra utilizado fue de aproximadamente 6 mg, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, una velocidad de flujo de 50 ml/min y con una rampa de calentamiento de 10 °C/min.

Cabe resaltar que, previo a la toma de datos, se hizo un borrado térmico con el fin de eliminar el historial térmico de procesamiento en las muestras.

Asimismo, por medio de un analizador termogravimétrico (TGA) se determinó la temperatura máxima de degradación térmica de los materiales compuestos.

El tamaño de las muestras fue de aproximadamente 9 mg, bajo una atmósfera inerte de nitrógeno, con una velocidad de flujo de 50 ml/min. El rango de calentamiento se extendió desde temperatura ambiente hasta 800 °C, con una rampa de calentamiento de 30 °C/min.

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados tanto a la matriz de polipropileno como a los materiales compuestos con y sin agente de acople.

Respecto a la resistencia a la tracción, la Figura 2a muestra que el valor máximo para dicha propiedad es de 34,3 MPa, alcanzado por la matriz de PP. Por otro lado, los compuestos reforzados sin agente de acople presentaron un valor máximo de 18,6 MPa con un 30 % p/p de fibra. Asimismo, los compuestos compatibilizados alcanzaron un valor máximo de 24,8 MPa con un 50 % p/p de fibra y 4 % p/p de MAPP, lo que representa reducciones en esta propiedad mecánica del 46 % y 28 %, respectivamente, en comparación con la matriz de PP.

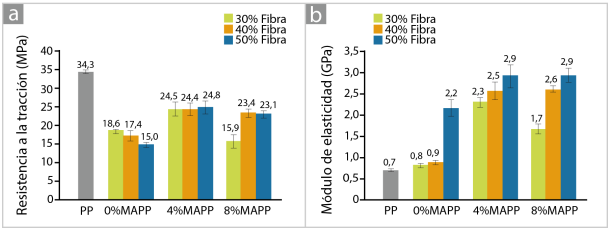

Figura 2. Propiedades de tracción de los materiales compuestos con y sin agente de acople: a) Resistencia a la tracción y b) Módulo de elasticidad

Como se puede observar, la resistencia a la tracción de los *composites* sin agente de acople tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza hidrofílica de las fibras y al carácter hidrofóbico de la matriz de polipropileno, lo que genera una incompatibilidad en dichos materiales y, por ende, una débil adhesión interfacial que se intensifica con el incremento del contenido de refuerzo [26, 27].

No obstante, al adicionar un 4 % p/p de agente de acople a los *composites*, se observa una mejora en comparación con los *composites* sin compatibilizar, debido a que el MAPP proporciona una mayor adhesión interfacial fibra-matriz, lo que conlleva un aumento en la resistencia a la tracción.

Sin embargo, al incrementar la cantidad de MAPP al 8 % p/p no se observa un efecto positivo; por el contrario, esta propiedad tiende a disminuir ligeramente. Fuqua y Ulven [28] atribuyen este comportamiento a la formación de enlaces débiles (van der Waals) entre el agente de acople remanente y la matriz de polipropileno, lo que reduce la resistencia mecánica del compuesto.

De acuerdo con lo anterior, ningún *composite* (reforzado, con y sin agente de acople) alcanza el valor en la resistencia a la tracción obtenido por el polipropileno. Este aspecto se debe a que la técnica de MCC no induce una orientación de las fibras con respecto a una

dirección preferente, sino que genera una orientación aleatoria, lo que reduce considerablemente el aporte de las fibras sobre la resistencia del *composites*.

Este mismo fenómeno ha sido reportado por otros autores [29], quienes lo atribuyen a la distribución aleatoria de las fibras dentro de la matriz y a la relación de aspecto final (longitud/diámetro) que presentan las fibras luego del procesamiento. Estas sufren un alto nivel de rotura debido a los esfuerzos de cizallamiento generados por los equipos de procesamiento (molino, extrusora), lo que da como resultado fibras de menor longitud, las cuales impiden una transferencia eficiente de esfuerzos en el *composites*.

Adicionalmente, tras el procesamiento, las fibras presentan una longitud inferior a la longitud crítica requerida para el sistema bambú-PP; la cual, según [26] es de aproximadamente 3,5 mm.

En cuanto al módulo de elasticidad (Figura 2b), se observa que, al incorporar fibras cortas de GAK en la matriz, existe un aumento significativo en esta propiedad, el cual se ve potenciado con la adición del agente de acople (MAPP).

Cuantificando este aumento con respecto al polipropileno virgen (0,7 GPa), el módulo de elasticidad aumenta en un 212 % (2,2 GPa) con un 50 % p/p de fibra, y hasta un 322 % (2,9 GPa) cuando se incorpora además un 4 % p/p de MAPP a la misma concentración de fibra. Estos resultados son coherentes con lo reportado por [30].

Dichos autores atribuyen esta mejoría a la contribución del carácter rígido de las fibras y al alto contenido de refuerzo en *composites*, ya que esta propiedad depende fuertemente de la fracción de refuerzo.

Además, la incorporación del agente de acople genera mayores valores de módulo de elasticidad en comparación con los *composites* sin compatibilizante, al formar enlaces covalentes entre los grupos anhídrido del MAPP y los grupos hidroxilo de las fibras de GAK, así como enlaces del grupo no polar del MAPP con el PP virgen, tal como lo reportaron Chattopadhyay et al. [23].

De esta manera, se logra una mejor adhesión interfacial entre la fibra y la matriz, y, por lo tanto, una transferencia de esfuerzos más eficiente desde la matriz hacia las fibras [23].

Sin embargo, a pesar de los efectos positivos asociados con la adición del compatibilizante, un incremento del MAPP al 8 % p/p no produce mejoras adicionales; por el contrario, puede disminuir ligeramente esta propiedad, como se explicó previamente [28].

Asimismo, mediante imágenes SEM se realizó un análisis cualitativo de la interfaz fibra-matriz de los *composites* después de ser sometidos a ensayos de tracción, con el fin de identificar posibles fallas y defectos.

En la Figura 3 (a y b) se observa que, al incorporar agente de acople en los materiales compuestos, se presenta una mayor mojabilidad de la matriz y una mejor impregnación entre la matriz y la fibra (Figura 3b).

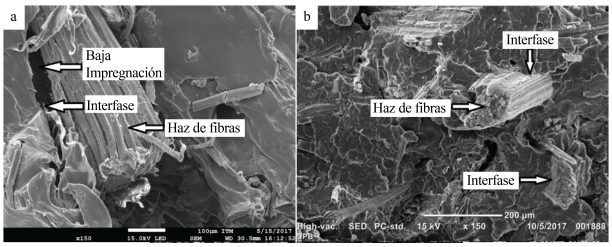

Figura 3. Imágenes SEM de la superficie de fractura a tracción de los materiales compuestos: a) 30 % p/p fibra y 0 % p/p MAPP, b) 30 % p/p fibra y 4 % p/p MAPP.

La adición del MAPP modifica la interfaz fibra-matriz, promoviendo un aumento de las interacciones entre ambas fases y mejorando la transferencia de esfuerzos de la matriz hacia la fibra, lo que favorece un mejor desempeño mecánico en los *composites* compatibilizados.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de flexión a tres puntos, tanto para el PP virgen como para los materiales compuestos reforzados, con y sin agente de acople. Se observa un valor máximo para la resistencia a la flexión (Figura 4a) de 34,0 MPa, correspondiente a la formulación con un 40 % p/p de fibra y un 4 % p/p de MAPP.

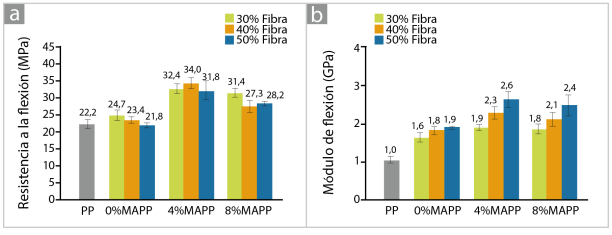

Figura 4. Propiedades de flexión de los materiales compuestos con y sin agente de acople: a) Resistencia a la flexión y b) Módulo de flexión

En el caso de los *composites* reforzados sin agente de acople, se evidencia un incremento del 11,46 % en esta propiedad (24,7 MPa) con un 30 % p/p de fibra. Por otro lado, con la adición del refuerzo al 40 % p/p y MAPP al 4 % p/p, la mejora asciende al 53,34 % (34,0 MPa), en comparación con el PP virgen.

La resistencia a la flexión mejora ligeramente al aumentar el porcentaje de fibra sin compatibilizar la matriz, aunque esta tendencia se revierte cuando la carga de fibra supera el 40 % p/p. Esta disminución ha sido reportada por otros autores [27], quienes la atribuyen a la incompatibilidad entre la matriz hidrófoba y el refuerzo hidrófilo, así como a una distribución menos uniforme de las fibras en la matriz a mayores concentraciones.

En contraste, cuando se compatibiliza la matriz con MAPP, se observa una mejora significativa en la

resistencia a la flexión, debido a una mejor adhesión interfacial mejora entre la fibra y la matriz, lo cual favorece una transferencia de esfuerzos más eficiente a lo largo de la interfaz fibra-matriz [23].

Sin embargo, al aumentar la concentración de MAPP al 8 % p/p, la resistencia a la flexión tiende a disminuir ligeramente, comportamiento similar observado en la resistencia a la tracción [28].

En la propiedad de módulo de flexión (Figura 4b), se observa un aumento máximo de aproximadamente 83 % (1,9 GPa) en los *composites* sin agentes de acople, y de 154 % (2,6 GPa) en los *composites* compatibilizados, en comparación con el polipropileno virgen (1,0 GPa).

De lo anterior, es importante resaltar la mejora obtenida en el módulo de flexión debido a la adición del refuerzo, la cual se incrementa considerablemente con la utilización del agente de acoplamiento.

Según lo reportado en [30], el comportamiento del módulo de flexión es similar al del módulo de elasticidad y tiende a incrementarse con el uso del MAPP. Esto sugiere que ambas propiedades reflejan de mejor manera la adhesión interfacial entre las fibras de GAK y el polipropileno. De manera similar, en [9], observaron una tendencia semejante, indicando una mejor transferencia de esfuerzos más eficiente desde la matriz hacia la fibra; así como un aumento en la rigidez del *composites*. Esto se debe a que las fibras de GAK presentan un alto módulo de elasticidad, y, por lo tanto, mayores porcentajes de refuerzo requieren un mayor esfuerzo para alcanzar el mismo nivel de deformación.

No obstante, como se ha mencionado anteriormente, el agente de acople en concentraciones al 8 % p/p no proporciona un efecto positivo sobre esta propiedad. Este comportamiento se atribuye a la presencia de moléculas residuales de MAPP que no logran formar enlaces covalentes entre las fibras y la matriz [17].

La Figura 5 presenta los valores obtenidos en los ensayos de impacto, lográndose una resistencia máxima de 47,2 J/m con un 50 % p/p de fibra y 0 % p/p de MAPP. Este valor representa un aumento del 50 % aproximadamente, comparado con el polipropileno virgen (31,4 J/m).

De acuerdo con la literatura, el aumento en esta propiedad mecánica se asocia con la presencia de la unión mecánica en la interfaz, lo que permite una transferencia de esfuerzos más eficiente entre ambos materiales. Además, el incremento lineal de esta propiedad con el contenido de fibra se atribuye a la disponibilidad de una mayor área interfacial [23].

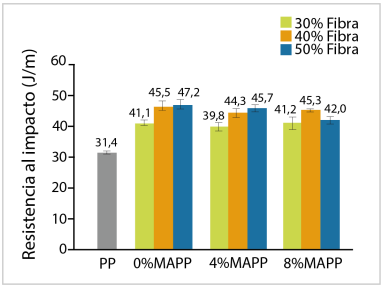

Figura 5. Resistencia al impacto de los materiales compuestos elaborados

Asimismo, la adición del refuerzo contribuye a una mayor absorción de energía, promovida por mecanismos de fractura que incluyen el desprendimiento, deslizamiento y fragmentación de la fibra, así como la fractura parcial del material no reforzado [31, 32].

Sin embargo, es evidente que los *composites* compatibilizados con un 4 % p/p de MAPP presentan una resistencia al impacto ligeramente menor a la alcanzada por los materiales compuestos sin agente de acople.

Según lo reportado en [33], esta disminución es consecuente con el aumento de la interacción y adhesión en la interfaz fibra-matriz, debido a la presencia de una interfaz química más fuerte que la unión mecánica anterior. A medida que aumenta esta interacción, se forma un enlace más sólido entre las dos fases, lo cual da lugar a un *composite* más rígido y duro, pero menos tenaz, que requiere una menor cantidad de energía para iniciar la fractura.

Asimismo, altos contenidos de MAPP (8 % p/p) no generan un mejor rendimiento en la resistencia al impacto. De acuerdo con [34], un exceso de agente de acople puede formar una capa de macromoléculas dentro del *composite*, creando una región débil rica en agente de acople que facilita el proceso de rotura y reduce la tenacidad del material.

En la Figura 6 se presentan los resultados de dureza superficial obtenidos para los *composites* elaborados. Se observa que, con un 50 % p/p de fibra de GAK y sin la presencia de MAPP el material compuesto muestra un aumento del 5 % en la dureza (78,13 Shore D) en comparación con el polipropileno virgen (74,13 Shore D).

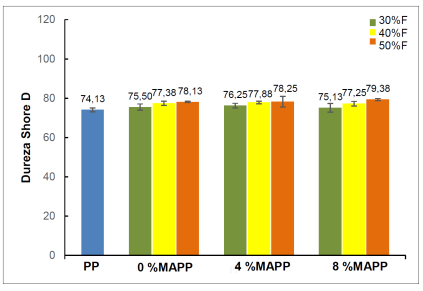

Figura 6. Dureza de los materiales compuestos elaborados

Este incremento puede atribuirse al efecto de refuerzo proporcionado por las fibras de GAK embebidas en la matriz polimérica. Al incorporar un 8 % p/p de MAPP como agente compatibilizante, con el mismo porcentaje de reforzante, se observa un aumento progresivo de la dureza, alcanzando un valor máximo de 79,38 Shore D, lo que representa un incremento del 7 % respecto al PP virgen.

Aunque la dureza obtenida sigue siendo cercana a la del PP virgen, debido a que la medición se realiza en la superficie del material compuesto, donde el PP es el componente predominante, el leve aumento sugiere que el uso del compatibilizante mejora la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz. Esto contribuye a una mejor cohesión superficial del *composite*, lo que lo hace más resistente a la penetración y al desgaste.

En la Figura 7 se presentan los termogramas de los ensayos DSC para los materiales compuestos elaborados, tanto sin como con agente de acople, utilizando como punto de comparación el polipropileno virgen.

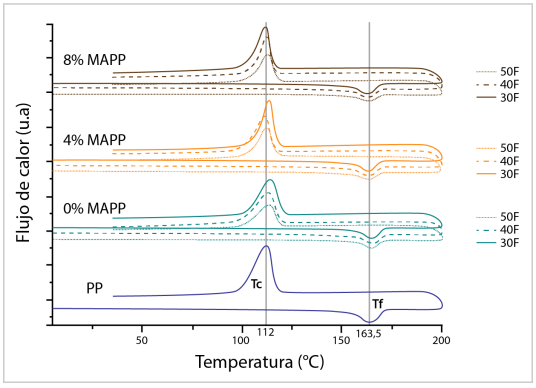

Figura 7. Curvas DSC para los materiales compuestos elaborados

Estos ensayos permitieron verificar la influencia del contenido de refuerzo y del agente de acople en el comportamiento térmico de los materiales compuestos.

Las temperaturas de fusión y cristalización del polipropileno virgen se observaron alrededor de 163,5 °C y 112 °C, respectivamente. Al incorporar el refuerzo y el agente de acople, no se evidencian cambios significativos en la temperatura de fusión con respecto al PP virgen, registrándose apenas un aumento de aproximadamente 2 °C.

Este leve incremento puede atribuirse a que las fibras poseen una mayor capacidad de absorción de calor en comparación con el polímero. No obstante, la adición de MAPP al 4 % p/p y 8 % p/p no produjo un efecto notable en esta propiedad [9], [35, 36].

En cuanto a la temperatura de cristalización, se observa que el incremento en el contenido de fibra genera un ligero aumento en esta propiedad, debido a que las fibras actúan como sitios de nucleación heterogénea, acelerando el proceso de cristalización [9], [37]. Además, al incorporar una mayor cantidad de fibras de bambú, el volumen libre disponible para las moléculas del polímero se reduce, lo que favorece la cristalización del *composite* a temperatura más alta durante el ciclo de enfriamiento [38].

No obstante, como se muestra en la Tabla 1, la entalpía de fusión para los *composites* disminuye al aumentar el contenido de refuerzo, ya que las fibras actúan como cargas inertes y, adicionalmente, la cantidad de polipropileno se reduce, requiriendo una menor cantidad de energía para fundir el material [39].

Tabla 1. Microservicio DELETE para eliminar registros

Muestra	Entalpía de fusión (J/g)	Entalpía de cristalización (J/g)
PP	114.5	104
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	79.95	78.16
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	65.32	75.44
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	55.11	51.7
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	75.95	71.21
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	72.69	83.39
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	77.8	72.9
30 % p/p F/0 % p/p MAPP	72.04	81.51
40 % p/p F/0 % p/p MAPP	71.94	60.96
50 % p/p F/0 % p/p MAPP	58.94	49.88

A pesar de ello, esta propiedad térmica presenta valores superiores en los *composites* compatibilizados con MAPP al 4 % p/p en comparación con aquellos con 0 % y 8 % p/p, lo cual indica que, a dicha concentración, se incrementan las interacciones entre la fibra y la matriz, mejorando la estabilidad térmica de los *composites*.

Por el contrario, al adicionar MAPP en una concentración del 8 % p/p, el agente de acople remanente en la matriz disminuye la estabilidad térmica, debido a que el MAPP posee una temperatura de fusión por debajo de la del polipropileno virgen [35].

Algo similar ocurre con la entalpía de cristalización, la cual comienza a disminuir como resultado de la menor proporción de polipropileno en los *composites* con mayores porcentajes de refuerzo, como se muestra en la Tabla 1 [35].

En los materiales compuestos compatibilizados con MAPP al 4 % p/p se observa un comportamiento similar al registrado en la entalpía de fusión, lo cual indica una mejora en la adhesión interfacial entre las fibras y la matriz.

Al utilizar una concentración al 8 % p/p de MAPP, se mantiene la misma tendencia encontrada en la entalpía de fusión.

En la Figura 8 se presentan las curvas DTG de los termogramas obtenidos a partir de los ensayos de TGA realizados a una lámina de polipropileno virgen, así como sobre los *composites* reforzados con y sin agente de acople, todos evaluados a una misma velocidad de calentamiento de 30 °C/min.

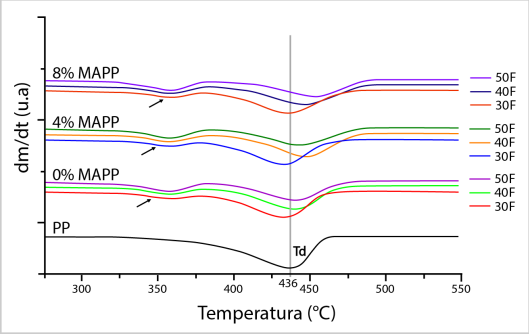

Figura 8. Curvas DTG para los materiales compuestos elaborados

La lámina de polipropileno se desintegra en una sola etapa, iniciando su descomposición alrededor de los 365 °C y finalizando aproximadamente a los 436 °C. Al adicionar fibras de bambú, se observa una segunda etapa previa a la de la lámina de PP (véase flecha), la cual se asocia con la degradación del material de refuerzo. Esta segunda etapa se vuelve más pronunciada a medida que incrementa el nivel de refuerzo, debido a la descomposición de los constituyentes de bajo peso molecular presentes en las fibras naturales, como la celulosa y la hemicelulosa, que están más presentes en altos porcentajes de fibra [35].

Sin embargo, como se observa en la gráfica y como se ha mencionado anteriormente, un mayor contenido de fibra incrementa ligeramente la estabilidad térmica de los *composites* [9], [35]. Asimismo, las temperaturas de degradación de los *composites* reforzados, tanto con como sin agente de acople, son ligeramente mayores en comparación con la del polipropileno virgen, lo que indica una degradación térmica más lenta. Esto se debe a la capacidad de absorción de calor del agente de refuerzo, la cual es superior en los *composites* reforzados con agente de acople, indicando una mejora en la adhesión interfacial gracias a la compatibilización [35], [37].

4. Conclusiones

La resistencia a la tracción de los *composites* elaborados disminuye con el aumento de la concentración de fibra. En contraste, el módulo elástico presentó un incremento de hasta de un 322 % con la adición del agente de acople al 4 % p/p.

De igual manera, el análisis a través de imágenes SEM confirma que la incorporación de MAPP mejora la interfaz fibra-matriz, al promover mayores interacciones entre ambas fases. Estos resultados coinciden con los ensayos de tracción, que evidencian un mejor desempeño mecánico en los *composites* compatibilizados.

Por otro lado, la resistencia a la flexión y el módulo de flexión de los *composites*, en comparación con la matriz de polipropileno, presentan un incremento máximo del 55 % y 154 %, respectivamente, cuando se adiciona el agente de acople. Asimismo, la resistencia al impacto de los materiales compuestos se incrementó hasta un 50 % con la adición del refuerzo sin agente de acople (50 % p/p de fibra y 0 % p/p MAPP).

En cuanto a la dureza, el ligero aumento del 7 % con respecto al PP virgen, al incorporar un 50 % p/p de fibra y un 8 % p/p de MAPP, indica el efecto positivo del refuerzo proporcionado por las fibras de GAK. Asimismo, sugiere que el compatibilizante mejora la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz, lo cual incrementa la resistencia a la penetración y al desgaste del material compuesto.

Las temperaturas de fusión y de cristalización no se ven afectadas por la incorporación de los agentes de refuerzo y compatibilización en la matriz. Sin embargo, las entalpías de fusión y de cristalización tienden a disminuir al incorporar el refuerzo y el MAPP, dado que estas propiedades dependen de la cantidad de polímero disponible tanto para cristalizar como para fundirse.

Por otro lado, las temperaturas de degradación del polímero muestran un ligero aumento con la adición de las fibras de GAK y del MAPP; ya que las fibras poseen una mayor capacidad de absorción de energía, y el agente de acople mejora la adhesión interfacial entre ambas fases. Esto contribuye a una mayor demanda energética para la degradación térmica del polímero.

En términos generales, para concentraciones superiores de MAPP (8 % p/p), no se observa ningún efecto significativo en las propiedades mecánicas ni térmicas. Por lo tanto, se determina que la concentración óptima del agente de acople es del 4 % p/p.

La adición de fibras de GAK y del agente de acople (MAPP) al polipropileno modificó el comportamiento mecánico de la matriz, obteniéndose materiales más rígidos, con mayor resistencia a la flexión y una mayor capacidad de absorción de energía ante impactos. De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, la mejor configuración del material compuesto corresponde a la formulación con un 50 % p/p de fibra y un 4 % p/p de MAPP.

Se sugiere el uso de este material en la industria automotriz para la fabricación de piezas semiestructurales, tales como paneles de puertas, respaldos de asientos, revestimiento de cajuelas, charola de pisos y tableros. Estas piezas, en algunas compañías automovilísticas, han sido elaboradas tradicionalmente solo con polipropileno.

Cabe resaltar que el refuerzo de dichos componentes contribuiría a mejorar su desempeño mecánico con respecto a la matriz virgen, además de favorecer el aligeramiento del automotor.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación (CIDI) de la Universi-

dad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, por la financiación del proyecto de investigación con radicado 439B-08/15-18. Igualmente, se agradece al Grupo de Investigación en Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su contribución en el suministro de materias primas para la ejecución de este proyecto.

Rol de autores

- **Leidy Quintero:** conceptualización, investigación, metodología, validación, análisis formal, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, visualización.
- **Alexis García:** redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, análisis formal, validación.
- **Alejandro Alcaraz:** Redacción-borrador original, escritura- revisión y edición, enálisis formal, validación.
- **Jorge Fajardo:** Escritura – revisión y edición, análisis formal, validación.
- **Luis Cruz:** conceptualización, redacción-borrador original, redacción-revisión y edición, administración del proyecto, supervisión, adquisición de financiación.

Referencias

[1] H. Abdul Khalil, I. Bhat, M. Jawaid, A. Zaidon, D. Hermawan, and Y. Hadi, "Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review," *Materials & Design*, vol. 42, pp. 353–368, Dec. 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.015

[2] N. Kumar and D. Das, "Fibrous biocomposites from nettle (girardinia diversifolia) and poly(lactic acid) fibers for automotive dashboard panel application," *Composites Part B: Engineering*, vol. 130, pp. 54–63, Dec. 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.059

[3] Y. Wu, C. Xia, L. Cai, A. C. García, and S. Q. Shi, "Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound," *Journal of Cleaner Production*, vol. 184, pp. 92–100, May 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.257

[4] L. C. Botero Cortés, *Reproducción de la Guadua angustifolia por el método de chusquines*. Organisation Internationale pour le Bambou et le Rotin. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar2r4

[5] L. Osorio, E. Trujillo, A. Van Vuure, and I. Verpoest, "Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 30, no. 5, pp. 396–408, Mar. 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0731684410397683

[6] A. U. Md Shah, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, F. Cardona, and A. R. Abu Talib, "A review on the tensile properties of bamboo fiber reinforced polymer composites," *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 10 654–10 676, Sep. 2016. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.Shah

[7] V. K. Thakur and M. K. Thakur, "Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites," *Carbohydrate Polymers*, vol. 109, pp. 102–117, Aug. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039

[8] F. M. AL-Oqla, S. Sapuan, M. Ishak, and A. Nuraini, "Predicting the potential of agro waste fibers for sustainable automotive industry using a decision making model," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, pp. 116–127, Apr. 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.011

[9] C. Wang and S. Ying, "A novel strategy for the preparation of bamboo fiber reinforced polypropylene composites," *Fibers and Polymers*, vol. 15, no. 1, pp. 117–125, Jan. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s12221-014-0117-z

[10] F. M. AL-Oqla and S. Sapuan, "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 347–354, Mar. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.050

[11] M. Sood and G. Dwivedi, "Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 775–783, Dec. 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005

[12] T. H. Nam, S. Ogihara, H. Nakatani, S. Kobayashi, and J. I. Song, "Mechanical and thermal properties and water absorption of jute fiber reinforced

poly(butylene succinate) biodegradable composites," *Advanced Composite Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 241–258, Jun. 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/09243046.2012.723362

[13] A. A. El-Fattah, A. G. M. EL Demerdash, W. A. Alim Sadik, and A. Bedir, "The effect of sugarcane bagasse fiber on the properties of recycled high density polyethylene," *Journal of Composite Materials*, vol. 49, no. 26, pp. 3251–3262, Dec. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0021998314561484

[14] S. R. Ferreira, F. d. A. Silva, P. R. L. Lima, and R. D. Toledo Filho, "Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 730–740, Dec. 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120

[15] A. El-Sabbagh, "Effect of coupling agent on natural fibre in natural fibre/polypropylene composites on mechanical and thermal behaviour," *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. 126–135, Feb. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.047

[16] W. Chunhong, L. Shengkai, and Y. Zhanglong, "Mechanical, hygrothermal ageing and moisture absorption properties of bamboo fibers reinforced with polypropylene composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 35, no. 13, pp. 1062–1074, Mar. 2016. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0731684416637681

[17] W. Liu, T. Chen, X. Wen, R. Qiu, and X. Zhang, "Enhanced mechanical properties and water resistance of bamboo fiber–unsaturated polyester composites coupled by isocyanatoethyl methacrylate," *Wood Science and Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 1241–1255, Sep. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s00226-014-0668-6

[18] M. Das and D. Chakraborty, "Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 107, no. 1, pp. 522–527, Sep. 2007. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/app.26155

[19] J. T. Kang and S. H. Kim, "Improvement in the mechanical properties of polylactide and bamboo fiber biocomposites by fiber surface modification," *Macromolecular Research*, vol. 19, no. 8, pp. 789–796, Jul. 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s13233-011-0807-y

[20] Z. Ying-Chen, W. Hong-Yan, and Q. Yi-Ping, "Morphology and properties of hybrid composites based on polypropylene/polylactic acid blend and bamboo fiber," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 20, pp. 7944–7950, Oct. 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.007

[21] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552–1596, Nov. 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003

[22] J. Fajardo Seminario, L. Quintero, J. García, D. Londoño Mesa, and L. Cruz, "Estudio de las propiedades mecánicas de los haces de fibras de *Guadua angustifolia* kunth ecuatoriana extraída a partir de diferentes métodos," in *XIII Congreso Nacional de Corrosión y IV Congreso Internacional de Integridad estructural*, Aug. 2016, xIII Congreso Nacional de Corrosión y IV Congreso Internacional de Materiales e Integridad Estructural, ASCOR 2016 ; Conference date: 24-08-2016 Through 26-08-2016. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar2r23

[23] S. K. Chattopadhyay, R. K. Khandal, R. Uppaluri, and A. K. Ghoshal, "Bamboo fiber reinforced polypropylene composites and their mechanical, thermal, and morphological properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 119, no. 3, pp. 1619–1626, Aug. 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/app.32826

[24] A. N. Kasim, M. Z. Selamat, N. Aznan, S. N. Sahadan, M. A. Mohd Daud, R. Jumaidin, and S. Salleh, "Effect of pineapple leaf fiber loading on the mechanical properties of pineapple leaf fiber – polypropylene composite," *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 21, Dec. 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.11113/jt.v77.6617

[25] C. Kakou, F. Arrakhiz, A. Trokourey, R. Bouhfid, A. Qaiss, and D. Rodrigue, "Influence of coupling agent content on the properties of high density polyethylene composites reinforced with oil palm fibers," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 641–649, Nov. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.044

[26] S. Nahar, R. Khan, K. Dey, B. Sarker, A. Das, and S. Ghoshal, "Comparative studies of mechanical and interfacial properties between jute and bamboo fiber-reinforced polypropylene-based composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 15–32, Jul. 2011. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0892705711404725

[27] M. R. Rahman, S. Hamdan, D. M. A. Hashim, M. S. Islam, and H. Takagi, "Bamboo fiber polypropylene composites: Effect of fiber treatment and nano clay on mechanical and thermal properties," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 253–258, Jul. 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/vnl.21407

[28] M. A. Fuqua and C. A. Ulven, "Preparation and characterization of polypropylene composites reinforced with modified lignocellulosic corn fiber," in *2008 Providence, Rhode Island, June 29 - July 2, 2008*, ser. prov2008. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008. [Online]. Available: http://doi.org/10.13031/2013.24770

[29] S. Huda and Y. Yang, "A novel approach of manufacturing light-weight composites with polypropylene web and mechanically split cornhusk," *Industrial Crops and Products*, vol. 30, no. 1, pp. 17–23, Jul. 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.12.007

[30] R. Karnani, *Kenaf-reinforced polypropylene composites*. Departmanet of Chemical Engineering, Michigan State, 1996. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar2r31

[31] M. A. Hidalgo-Salazar, M. F. Muñoz, and J. H. Mina, "Influence of incorporation of natural fibers on the physical, mechanical, and thermal properties of composites ldpe-al reinforced with fique fibers," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1–8, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1155/2015/386325

[32] N.-M. Barkoula, B. Alcock, N. Cabrera, and T. Peijs, "Fatigue properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 16, no. 2, pp. 101–113, Feb. 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/096739110801600203

[33] L. Rodríguez Sepulveda, *Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano*. Universidad Nacional de Manizales, 2014. [Online]. Available: https://upsalesiana.ec/ing34ar2r35

[34] X. Zhou, Y. Yu, Q. Lin, and L. Chen, "Effects of maleic anhydride-grafted polypropylene (mapp) on the physico-mechanical properties and rheological behavior of bamboo powder-polypropylene foamed composites," *BioResources*, vol. 8, no. 4, Oct. 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.4.6263-6279

[35] S.-Y. Lee, I.-A. Kang, B.-S. Park, G.-H. Doh, and B.-D. Park, "Effects of filler and coupling agent on the properties of bamboo fiber-reinforced polypropylene composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 28, no. 21, pp. 2589–2604, Sep. 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0731684408094070

[36] N. T. Phuong, C. Sollogoub, and A. Guinault, "Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp/bamboo fiber composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, no. 21, pp. 3244–3256, Aug. 2010. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0731684410370905

[37] V. Srebrenkoska, G. B. Gaceva, M. Avella, M. E. Ericco, and G. Gentile, "Utilization of recycled polypropylene for production of eco-composites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 48, no. 11, pp. 1113–1120, Oct. 2009. [Online]. Available: https://doi.org/10.1080/03602550903147247

[38] J. Lisperguer, X. Bustos, Y. Saravia, C. Escobar, and H. Venegas, "Efecto de las características de harina de madera en las propiedades físico-mecánicas y térmicas de polipropileno reciclado," *Maderas. Ciencia y tecnología*, no. ahead, pp. 0–0, 2013. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000025

[39] I. Baroulaki, O. Karakasi, G. Pappa, P. Tarantili, D. Economides, and K. Magoulas, "Preparation and study of plastic compounds containing polyolefins and post used newspaper fibers," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 10, pp. 1613–1625, Oct. 2006.