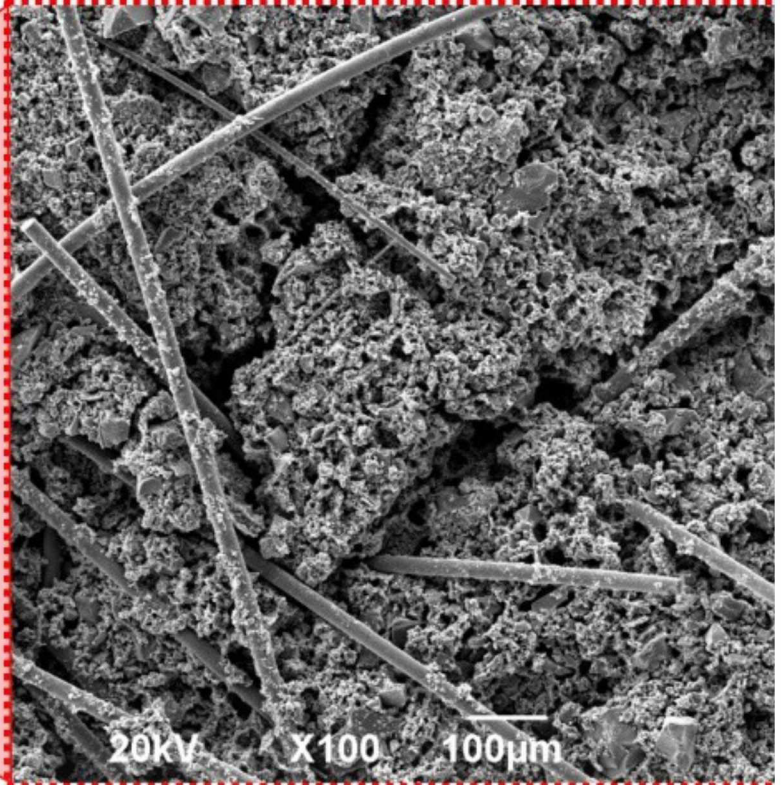
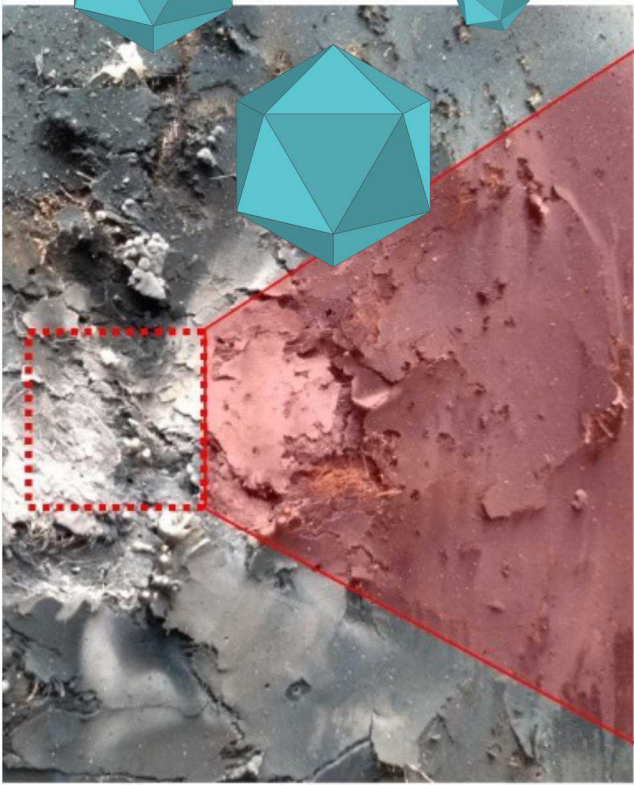
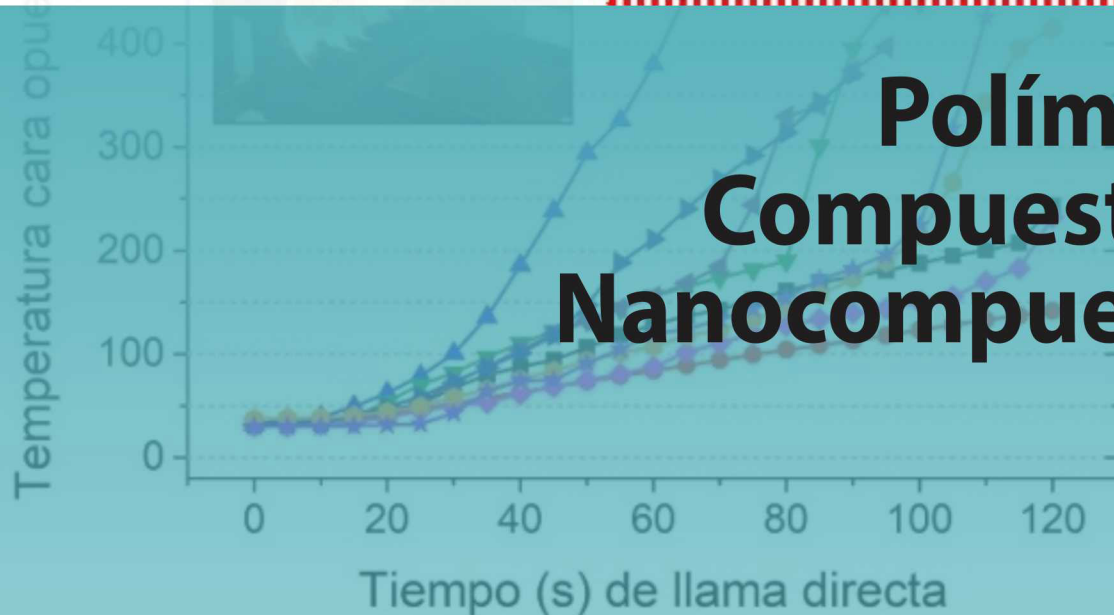




Polímeros Compuestos y Nanocompuestos



CONTENIDO

Un medio de reacción verde para la modificación de celulosa de residuos lignocelulósicos de la industria figuera.....	9
Omar Salinas, Ricardo Benítez, Jaime Martin	
Caracterización de membranas compuestas por nanofibras de acetato de celulosa preparadas por electrohilado para la retención de micropartículas suspendidas en el agua.....	13
Andrés Mauricio Ramírez Alba, Edwin Yesid Gómez-Pachon	
Uso de materiales compuestos de polímeros con fibras naturales NFC en Colombia: perspectivas y oportunidades.....	17
Julio A. Salgado Reyes, Fabián Rodrigo Velandia Herrera	
Aprovechamiento de residuos de cenizas como carga en materiales compuestos de matrices poliméricas reprocesada.....	21
Lina Marcela Crespo, Carolina Caicedo, Juan Camilo González	
Comportamiento ablativo de compuestos de matriz polimérica y su aplicación en el campo aeroespacial.....	23
Rafael Robayo-Salazar, Julian Portocarrero Hermann, Ubaldo Díaz Padrón, Oscar Patiño Castrillón	

Un medio de reacción verde para la modificación de celulosa de residuos lignocelulósicos de la industria fiquera

A green reaction medium for cellulose modification of lignocellulosic residues of the fiquera industry

Modalidad: Póster

Omar Salinas¹
Ricardo Benítez²
Jaime Martín³

¹ Universidad del Cauca, QPN, Sector Tulcán, Carrera 2 # 15 (esquina), Popayán, Colombia.
oasalinas@unicauca.edu.co

² Universidad del Cauca, QPN, Sector Tulcán, Carrera 2 # 15 (esquina), Popayán, Colombia.
rbenitez@unicauca.edu.co

³ Universidad del Cauca, QPN, Sector Tulcán, Carrera 2 # 15 (esquina), Popayán, Colombia.
jmartinf@unicauca.edu.co

Resumen

El polvillo de fique, residuo de la industria fiquera con alto contenido de celulosa, fue modificado mediante reacción de esterificación en *D*-limoneno. Se realizó un pretratamiento de la muestra con el fin de eliminar interferentes para luego ser llevado a reacción con ácido oxálico. El producto de reacción se filtró al vacío y lavó con solución acuosa: etanol (70:30) y se caracterizó mediante el uso de técnicas espectroscópicas (FTIR-ATR) y térmicas (TGA). Los resultados del análisis espectroscópico revelaron la presencia de nuevos grupos carbonílicos, indicando que la reacción de esterificación fue exitosa. El análisis térmico reveló un aumento en la estabilidad térmica del producto final. Se comprobó la modificación de la celulosa presente en los residuos de la industria fiquera.

Palabras clave: celulosa; esterificación; ácido oxálico; verde.

Introducción

El fique (*Furcraea* spp.) es una planta que produce una de las fibras vegetales más representativas de Colombia y América Tropical y ofrece infinidad de utilidades industriales y artesanales al mundo. (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014). Las fibras producidas por esta planta se caracterizan por ser largas, duras y por poseer atributos importantes para la producción de cordeles, empaques, textiles, entre otros. A su vez, se combina con otras fibras naturales para diversificar la gama de productos. La fibra de fique no solo sirve para hacer empaques, también se utiliza en la fabricación de productos étnicos y artesanías colombianas. (López; Olmedo; Moreno; Castillo, 2017) Los residuos producidos por el descortezado, tales como el jugo de fique, las partículas del tejido parenquimatoso triturado y los fragmentos de las hojas y fibras son el principal problema en la industria fiquera debido al gran volumen de biomasa que representan.

En general, la composición de estos residuos agroindustriales contiene celulosa, la cual está entre 30 y 70%, hemicelulosa entre 10 y 30 % y lignina entre 5 y 20 %. (Suesca-Díaz, 2012). El alto contenido de celulosa en estos residuos los convierte en un recurso de alto potencial en la industria de polímeros. Los polímeros a base de celulosa han sido diseñados y ajustados para obtener ciertas propiedades deseadas. Esto se hace alterando la red de enlaces de hidrógeno inherente e introduciendo



diferentes sustituyentes. Existen innumerables aplicaciones para estos derivados de celulosa a nivel industrial, desde medicina, hasta papelería y textiles. (Granström, 2009)

De acuerdo a las estadísticas reportadas por el Anuario Estadístico de Colombia en 2011, la superficie cosechada, la producción y los rendimientos para los cultivos típicos en el departamento del Cauca son: para el cultivo de fique, 7.755 ha, 8.976 ton y 9.226 Kg/ha (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2012). Lo anterior evidencia un volumen considerable de generación de residuos que pueden ser aprovechados. Estos residuos resultantes de la etapa del peinado de la fibra larga de fique en las rallanderías son desaprovechados en el departamento del Cauca y se convierten en inconvenientes para la sostenibilidad de las cadenas productivas de estos cultivos.

Actualmente, EMPAQUES DEL CAUCA S.A, una de las empresas dedicadas a la producción de fibra de fique en la ciudad de Popayán genera aproximadamente 16 toneladas de residuos de fique al mes. El presente trabajo busca explotar estos desechos agrícolas ricos en celulosa como una alternativa potencial para la producción de derivados de celulosa.

Materiales y Métodos

Materiales

Los sustratos hidróxido de sodio de Sigma Aldrich y ácido oxálico dihidratado de Fischer fueron obtenidos de grado analítico, el polvillo de fique fue suministrado por la empresa EMPAQUES DEL CAUCA S.A. y el D-Limoneno fue obtenido de tipo industrial del 95 % de pureza.

Pretratamiento de las fibras

100 g de polvillo de fique (PF) fueron lavados con agua destilada 5 veces y sumergido en esta durante dos días, posteriormente fue secado en horno a 80 °C durante 48 horas, el PF seco (PST) fue sumergido en solución de NaOH 2 mol/L durante cuatro días, luego fue lavado con agua destilada hasta pH neutro (6-7) y secado en horno a 80 °C durante 48 horas, finalmente fue triturado y tamizado en malla de 0,5 mm para obtener polvillo pretratado (PTA)

Modificación de la celulosa

La modificación de la celulosa presente en los residuos fue llevada a cabo con 0,5 g de PTA, 5 mL de D-Limoneno y ácido oxálico en proporciones de 1:3 con respecto a la masa de PTA, fueron llevados a reacción en balón de fondo plano acopalado a un sistema de reflujo a una temperatura de 160 °C, con agitación durante 2 horas utilizando magneto. Al terminar el tiempo de reacción la muestra fue filtrada al vacío, lavada con una mezcla de agua:etanol (70:30) múltiples veces hasta retirar el exceso de D-limoneno y ácido oxálico, finalmente fue secada a 80 °C durante 24 horas hasta obtener OXC.

Caracterización por espectroscopía FTIR-ATR

Los espectros infrarrojos fueron tomados para las muestras PST, PTA y OXC en un espectrofotómetro FTIR Thermo Scientific usando FTIR-ATR en el rango de 4000 a 600 cm^{-1} .

Caracterización por TGA

Las curvas de análisis termogravimétrico (TGA) y sus correspondientes derivadas (DTA) fueron tomadas para las muestras de PST, PTA y OXC en el equipo Q50 V20.10 Build 36 desde 0 °C hasta 600 °C en atmósfera de nitrógeno, empleando una rampa de 20 °C/ min.

Resultados y discusiones

En la Figura 1 se observa el espectro FTIR-ATR de PST (a) y PTA (b). La muestra de PST (a) muestra una señal correspondiente a la tensión C=O de ésteres a 1742 cm^{-1} y la respectiva tensión C-O de estos a 1242 cm^{-1} , indicando la presencia de grupos ésteres en PST por parte de las unidades de hemicelulosa. Al realizar el tratamiento alcalino, estas señales desaparecen debido a que este proceso remueve la hemicelulosa y otros interferentes presentes liberando la mayor cantidad de celulosa posible. La ausencia de señales de ésteres en el espectro IR indica la efectividad del tratamiento alcalino al remover grupos interferentes presentes en PST.

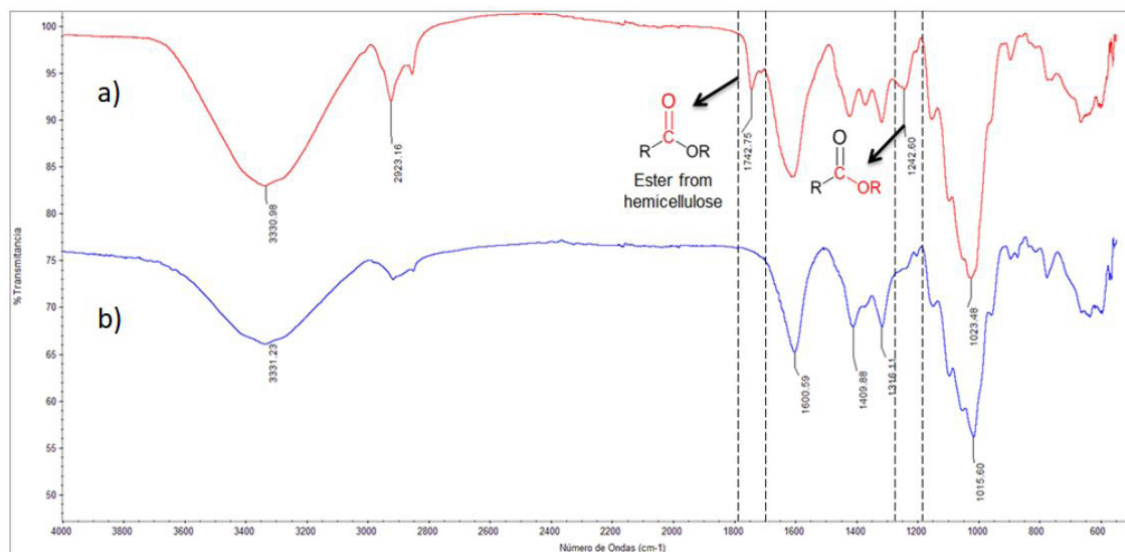


Figura 1. Espectros FTIR-ATR de PST (a) y PTA (b)
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se observan los espectros obtenidos para OXC (a) y PTA (b). El espectro de OXC (a) muestra la aparición de señales características de ésteres a 1731 cm^{-1} correspondientes a la tensión C=O del grupo carbonilo, y a 1200 cm^{-1} correspondientes a la tensión C-O de ésteres, indicando que se produce la esterificación de los grupos OH de las unidades de glucosa presentes en la celulosa de PTA.

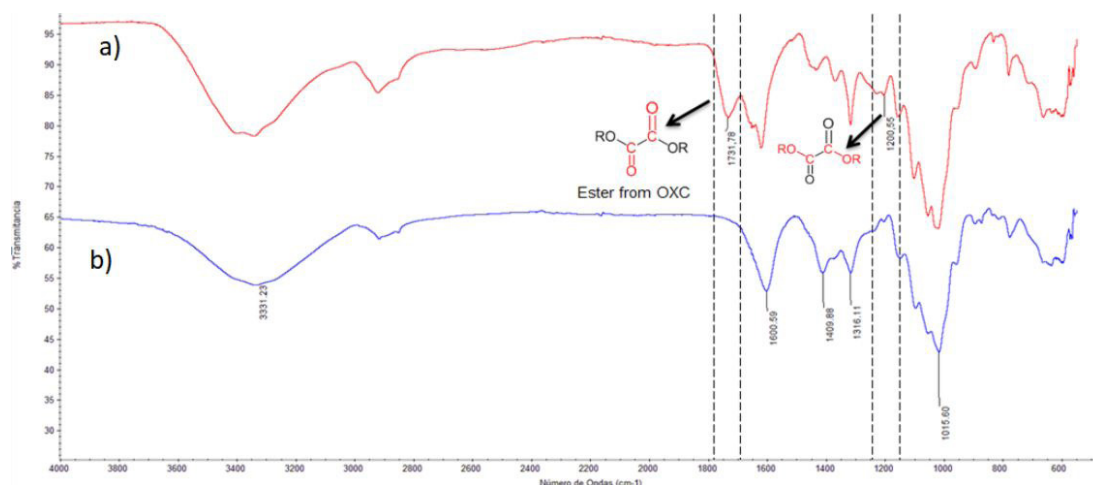


Figura 2. Espectros FTIR-ATR de OXC (a) y PTA (b)
Fuente: elaboración propia



Conclusiones

Este estudio desarrolló un método para obtener OXC a partir de residuos de la industria fiquera usando polvillo de fique y ácido oxálico en D-limoneno como medio de reacción. Los espectros FTIR-ATR comprobaron la presencia de señales de nuevos grupos carbonilo a 1731 cm^{-1} evidenciando la presencia de grupos ésteres.

Agradecimientos

Los autores agradecen al semillero de investigación de Química de Productos Naturales (QPN) de la Universidad del Cauca por el apoyo prestado para la realización de este trabajo.

Referencias

- Granström, Mari (2009). *Cellulose Derivatives: Synthesis, Properties and Applications* (Tesis de pregrado). University of Helsinki, Helsinki. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/14916693.pdf>
- López, Fanny; Olmedo, José; Moreno, Cristian; Castillo, Miguel (2017). *Viabilidad para producir y comercializar bolsas de fique para abastecer el mercado de los principales supermercados de cadena en Bogotá* (Tesis de especialización). Universidad católica de Colombia, Bogotá. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15471/1/Trabajo%20de%20Grado%20Grupo%20C1%20Grupo%203%20Bolsas%20de%20Fique.pdf>
- Ministeriodeagriculturaydesarrollorural(2012)*AnuarioEstadísticoAgropecuarioyPesquero.ResultadosyEvaluaciones Agropecuarias Municipales*. En: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/handle/11438/8507>
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2014). *Ficha técnica cultivo de fique*. En: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/005%20-%20Documentos%20T%C3%A9cnicos/005%20-%20D.T%20-%20Ficha%20Técnica%20Cultivo%20de%20Fique.pdf>
- Suesca-Díaz, Adriana (2012). *Producción de enzimas celulolíticas a partir de cultivos de Trichoderma sp. con biomasa lignocelulósica* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/7843/1/300054.2012.pdf>

Caracterización de membranas compuestas por nanofibras de acetato de celulosa preparadas por electrohilado para la retención de micropartículas suspendidas en el agua

Characterization of membranes composed of nanofibers of cellulose acetate prepared by electro-spinning for the retention of microparticles suspended in water

Modalidad: Póster

Andrés Mauricio Ramírez Alba¹
Edwin Yesid Gómez-Pachón¹

¹ Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia, Diseño innovación y asistencia técnica de materiales avanzados -DITMAV, Duitama, Colombia.
andres.ramirez01@uptc.edu.co

Resumen

El desarrollo de tecnologías para el tratamiento de agua es un tópico de interés internacional a causa del deterioro de este recurso. Este proyecto tuvo como objetivo preparar y evaluar membranas de nanofibras de acetato de celulosa, se utilizó una solución al 13 % en acetona y etanol, en proporción 2:1 sometida a electrohilado, y se estudió la viabilidad técnica del material para desarrollo de filtros de agua con alta eficiencia, esto se evaluó mediante cuantificación de las propiedades funcionales tales como la porosidad con el ensayo de punto de burbujeo, el caudal máximo de funcionamiento con la prueba de fisuramiento, la capacidad de adhesión de micropartículas. Las membranas desarrolladas tienen una alta aplicabilidad en la filtración de agua.

Palabras claves: acetato de celulosa, electrohilado, filtración, nanofibras.

Introducción

El electrohilado es un método que emplea una solución polimérica ionizable sometida a un campo eléctrico, el resultado de este proceso son membranas con micro y nanofibras (Rúa-Jiménez; Villate-Lagos; Gómez-Pachón; Torres-Perez; Muñoz Prieto, 2017) con una serie de propiedades singulares tales como alta resistencia, buena porosidad y gran área superficial, características que se logran debido a que los diámetros de las fibras se encuentran por debajo de una micra, propiciando el uso de estos materiales en aplicaciones avanzadas como ingeniería de tejidos, textiles, medios de filtración, membranas especiales, además de diferentes usos médicos (Konwarh-Rocktotpal; Karak-Niranjan; Misra-Manjusri, 2013).

Actualmente el uso de biomateriales en aplicaciones avanzadas está en crecimiento, es por esto que se vienen desarrollando estudios donde se preparan estas membranas con polímeros naturales como el almidón de papa (Cárdenas; Gómez-Pachón; Muñoz; Vera-Graziano, 2016), acetato de celulosa (Ochica *et al.*, 2017), entre otros, donde se evidencian las excelentes propiedades que poseen estos materiales cuando son obtenidos por electrohilado, sin embargo, estos estudios se basan en la obtención y caracterización del material, haciendo evidente la necesidad de evaluar estos materiales en torno a

una aplicación específica.

El acetato de celulosa es un material de amplio espectro de aplicación ya que posee excelentes propiedades fisicoquímicas, además se aventaja respecto a otros materiales debido a que es un polímero de origen vegetal de fácil acceso mediante la transformación de residuos agroindustriales. Las nanofibras de acetato de celulosa han presentado excelentes propiedades, sin embargo, los estudios se centran en la obtención y caracterización del material (Ochica *et al.*, 2017).

Aplicando los avances en estos materiales se pretende dar respuesta a problemas sociales y ambientales como la calidad de agua, que aqueja atención por parte de comunidad científica internacional. Debido a esto se establece investigar las membranas de nanofibras de acetato de celulosa como objeto de estudio para abordar los retos científicos que sugiere la filtración de agua.

El objetivo de este estudio fue determinar algunas propiedades funcionales de las membranas de nanofibras preparadas con acetato de celulosa para su potencial aplicación en filtros de agua, así mismo, evaluar la viabilidad de éstas en el diseño de sistemas de filtración de agua.

Materiales y Métodos

En la preparación de la solución se utilizó acetato de celulosa (CA) Sigma-Aldrich al 39,8 % acetilo, acetona (Ac) Panreac al 93,5 % y etanol (EtOH) Sigma-Aldrich al 99,8 %. La solución de acetato de celulosa al 13 % disuelto en acetona y etanol en proporción 2:1 fue aplicada en el equipo de electrohilado diseñado en la UPTC (Rúa-Jiménez, 2017), con parámetros de distancia 17 cm y voltaje 19 kW. Se determinaron las propiedades morfológicas y metrológicas de las fibras por medio de microscopía de barrido electrónico SEM, (ZEISS EVO 10). Se midió la porosidad mediante el método de punto de burbujeo descrito en el método ASTM F316 donde se utiliza medida de presión de aire requerida para desplazar burbujas a través de la membrana humectada para calcular la porosidad. Además, se hizo una prueba de fisuramiento, método descrito en “La guía manual de filtración por membrana” (US EPA, 2005), donde se somete la membrana a un volumen de fluido (agua) con flujo controlado por unidad de tiempo.

Resultados y discusiones

Las micrografías SEM evidencian que las fibras obtenidas presentaron regularidad además no poseen fisuras ni bulbos significativos en su estructura, se encontró que el diámetro promedio de las fibras es de 627,15 nm con una variación estándar $\pm 121,3$ (ver Figura 1).

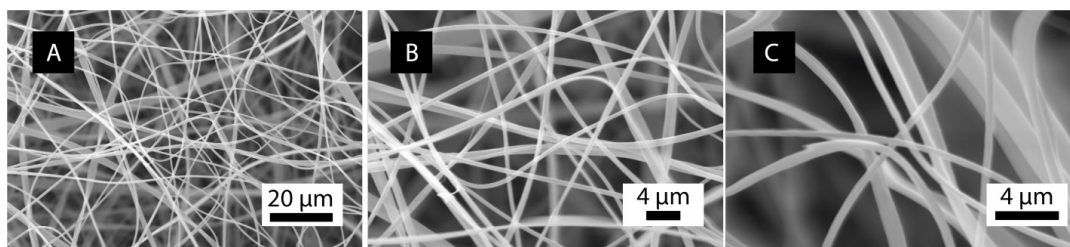


Figura 1. Micrografías SEM de membranas con nanofibras de acetato de celulosa a diferentes aumentos a fibra. Muestra 1 a 2000 aumentos (A), Muestra 2 a 5000 aumentos (B), Muestra 3 a 10000 aumentos (C).

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de la porosidad mediante el método de punto de burbujeo, se define mediante la ecuación $d=C\gamma/p$, donde d es el diámetro del poro en μm , γ es la tensión superficial en N/m , (dinas/cm), p es la tensión superficial del fluido con la que se hace la prueba y C es la constante que equivale a 0,415 cuando p está en psi. En la Tabla 1 se encuentran los resultados del ensayo a 5 muestras con su cálculo respectivo de diámetro de poro.

Tabla 1.
Resultados de porosidad en prueba de punto de burbujeo.

Muestra	1	2	3	4	5
Presión	5,5 psi	4 psi	4,5 psi	5 psi	6 psi
Tamaño de poro	5,4 μm	7,5 μm	6,7 μm	6,0 μm	5,0 μm

Fuente: elaboración propia.

La prueba de fisuramiento determinó que el caudal máximo que resiste un área de 78,5 mm² de la membrana a la inyección de 10 mL de agua, se realizaron pruebas a 50 mL/h, 100 mL/h, 200 mL/h, 250 mL/h y 300 mL/h, encontrando el fisuramiento superficial de la membrana sometida a 300 mL/h.

Conclusiones

Para el diseño de los sistemas de filtración se consideran los materiales que satisfagan requerimientos indispensables para el buen funcionamiento de los mismos, para utilizar las membranas compuestas por nanofibras de acetato de celulosa es esencial conocer los límites de funcionamiento y resistencia que poseen, con base a la información y datos obtenidos en este estudio.

La configuración óptima del equipo de electrohilado para la obtención de membranas con diámetros de 627 nm en promedio, son: 15 cm de distancia capilar-colector con un voltaje de 19 kW y una velocidad de inyección de 0,3 mL/h.

La medida de porosidad que arrojó los resultados de la prueba de punto burbujeo, tiene diámetros de poro entre 5 y 7.5 μm , indicando así que la aplicación en microfiltración de estas membranas es factible.

Se logró demostrar que la morfología de fibras puede lograr atrapar las partículas que están presentes en el agua de consumo por lo que se puede inferir que tienen potencial de aplicación en tecnologías de filtración de agua.

Agradecimientos

Se hace un agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC por la financiación del proyecto SGI 2439. Se agradece al Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales-INCITEMA por su apoyo en la realización de pruebas.

Referencias

- Cárdenas, W.; Gómez-Pachon, E. Y.; Muñoz, E.; Vera-Graziano, R. (2016). Preparation of potato starch microfibers obtained by electro wet spinning. In *II International Congress of Mechanical Engineering and Agricultural Science (CIIMCA 2015)*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 138(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/138/1/012001>
- Konwarh, Rocktotpal; Karak, Niranjana; Misra, Manjusri (2013). Electrospun cellulose acetate nanofibers: the present status and gamut of biotechnological applications. *Biotechnology advances*, 31(4), 421-437. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.01.002>



Ochica, Andrés; Muñoz-Prieto, Efrén; Vera-Graziano, Ricardo; Gómez-Pachón, Edwin; Cerda, Alfredo; Rivera-Torres, Filiberto (2017). Obtention of Cellulose Acetate Nanofibers from Sugar Cane Bagasse. *Ciencia en Desarrollo*, 8(2), 69-77.
<https://doi.org/10.19053/01217488.v8.n2.2017.4674>

Rúa-Jiménez, S. L.; Villate-Lagos, J. D.; Gómez-Pachón, E. Y.; Torres-Perez, Y.; Muñoz Prieto, E. (2017). Development of an Equipment to Prepare Nanofibers for Tissue Engineering Since a Standpoint of the Industrial Design. In *VII Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2016*, Bucaramanga, Santander, Colombia, October 26th-28th, 2016 (pp. 365-368). Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-10-4086-3_92

United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2005). Membrane filtration guidance manual. Recuperado de
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/901V0500.PDF?Dockkey=901V0500.PDF>

Uso de materiales compuestos de polímeros con fibras naturales NFC en Colombia: perspectivas y oportunidades

Use of polymer composite materials with natural NFC fibers in Colombia: perspectives and opportunities

Modalidad: Póster

Julio A. Salgado Reyes¹
Fabián Rodrigo Velandia Herrera²

¹ Profesor Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá Colombia.
jsalgador@ecci.edu.co

² Magíster en Ingeniería Mecánica, U. de los Andes, Bogotá Colombia.
fabianrvelandiah@yahoo.com

Resumen

Los compuestos de polímeros y fibras naturales son materiales de reciente desarrollo y que están empezando a abrirse mercado en la construcción en Colombia. Los perfiles de WPC para decks son la aplicación que está abriendo camino, pero existen oportunidades para abrir una industria utilizando varias fibras naturales disponibles o que podrían cultivarse en Colombia

Palabras clave: fibras naturales, materiales compuestos, polímeros, WPC.

Introducción

Los materiales compuestos combinan las mejores propiedades de materiales diferentes. Los compuestos de polímeros con fibras naturales combinan la procesabilidad, bajo costo y resistencia a corrosión de los polímeros con la baja densidad, rigidez y valor ecológico de las fibras naturales. La fabricación y utilización de estos materiales no es sencilla, debido a los costos relativamente altos de la tecnología requerida para procesarlos, pero son cada vez más comunes en el mercado colombiano. En virtud de que utilizan productos o subproductos agrícolas disponibles en Colombia es una gran oportunidad desarrollar tecnologías que permitan el uso de estos nuevos materiales.

Oportunidad en el mercado colombiano

Los materiales compuestos han tenido un gran desarrollo a nivel mundial, especialmente en el campo de la construcción, por sus ventajas inherentes de bajo peso, versatilidad para producir piezas con formas complejas y especialmente resistencia a la corrosión. Los compuestos más tradicionales son reforzados con fibras de vidrio y utilizando resinas termoestables, aunque los termoplásticos como PP y PEAD son cada vez más comunes (Stewart, 2010). El mercado de construcción en Colombia aún es dominado por los materiales tradicionales como concreto, gres y acero, a pesar de los requerimientos de bajo peso, costo y resistencia a la corrosión necesarios en muchas zonas rurales y urbanas.

Los compuestos de más reciente desarrollo son los compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales, impulsados por la necesidad de utilizar fuentes renovables y disminuir consumos de energía en la producción, haciendo más sostenibles los materiales. Se han utilizado en aplicaciones automotrices para tableros interiores, por su bajo peso y

su absorción acústica; y en aplicaciones de construcción mediante tablonos para pisos de exteriores, como decks, donde el compuesto fabricado generalmente con aserrín pulverizado y polietileno de alta densidad, puede soportar la intemperie y reemplazar a la madera (Spear; Eder; Carus, 2015).

Este tipo de compuestos son conocidos comercialmente como *Wood Plastic Composites* o WPC, y su mercado está en crecimiento en todo el mundo, especialmente en países desarrollados como son Estados Unidos, Alemania, Francia y España, debido principalmente a las ventajas de su uso respecto a la madera al requerir menos mantenimiento, no utilizar químicos para su inmunización, su equivalente función estética y por su valor medioambiental al promover el uso del reciclaje del plástico y otros productos de desecho de otras industrias. Existe una tendencia marcada mundialmente encaminada a la reducción de la tala de madera, lo cual promueve la solución con maderas hechas con material compuesto polimérico.

El uso de materiales Compuestos con Fibras Naturales (NFC - *Natural Fiber Composites*) en Colombia es muy incipiente, Su mayor utilización es en pisos deck (ver Figura 1) para uso exterior, con perfiles de WPC que utilizan específicamente como madera pulverizada o cascarilla de café. Este mercado de pisos deck en material polimérico ha tenido un crecimiento estimado en un promedio del 10 % anual desde el 2012 hasta el día de hoy. Es un mercado relativamente joven en Colombia, ya que aún no es común en la arquitectura nacional el uso de terrazas exteriores, y del cual existe sólo un productor en el país que sule cerca del 25 % del requerimiento nacional. El resto es suplido por producto importado principalmente de origen chino, con una presencia menor en el mercado productos de origen europeo y estadounidense, debido especialmente a su elevado costo. Este tipo de perfiles tiene un costo similar al de perfiles de madera para exteriores, pero la reducción en el costo de mantenimiento lo hace rentable a largo plazo.



Figura 1. Perfil para piso deck en WPC
Fuente: elaboración propia

Se puede ver en la Figura 2 las diferentes aplicaciones en que se está utilizando compuesto WPC en Europa en el año 2012, siendo la principal en pisos y otros perfiles de construcción, sin embargo resaltan otros usos como son: partes interiores de carros o aplicaciones de cercado y revestimientos exteriores. Se prevén importantes crecimientos de la demanda para este mercado para 2020 y en adelante, no sólo en Europa sino en todo el mundo, debido a las ventajas ofrecidas por el material en todas las aplicaciones en que se utiliza. En Colombia, actualmente la mayor aplicación de este tipo de material es en pisos deck, seguido de muros y paredes para algunas aplicaciones de viviendas de interés social hechas en este material.

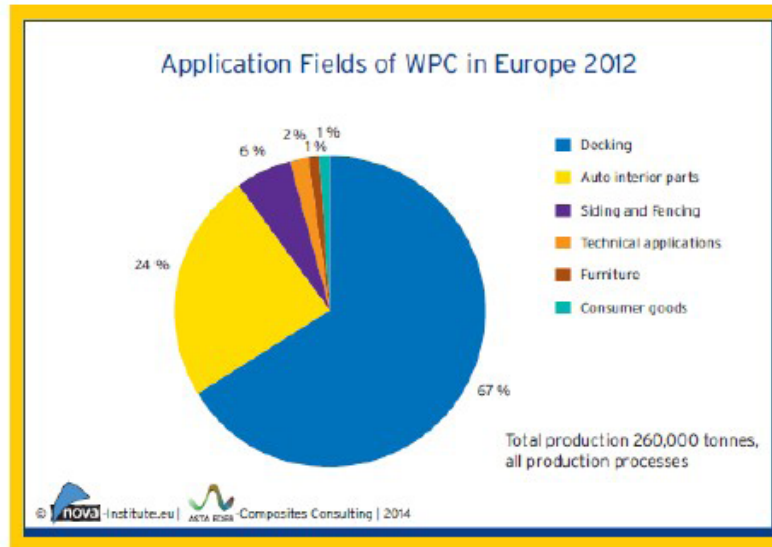


Figura 2. Aplicaciones de compuestos WPC en Europa.
Fuente: Carus et al., (2012).

La producción de este tipo de materiales tiene barreras complejas debido a las grandes inversiones necesarias para adquirir líneas de extrusión convencionales y adaptarlas para extrudir este tipo de perfiles. Esta inversión puede ser del orden de USD 1'000.000 según cotizaciones realizadas por los autores en 2019, teniendo una capacidad de producción demasiado alta para lo que se podría vender en un principio en el mercado nacional, haciendo muy riesgosa la inversión.

Adicional a lo anterior, el sector está altamente ligado al comportamiento de la industria de la construcción en Colombia. Según Procolombia (Procolombia, 2019) en los próximos 5 años el sector de la construcción crecerá a un promedio de 5 %, 4 % según (Rodríguez-Flórez (2019), ubicándose como uno de los sectores que conducirán el crecimiento del país.

Nuevas posibilidades

Las aplicaciones actuales más comunes utilizan las fibras naturales en forma pulverizada ya que permite la utilización de equipos de procesamiento comunes. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las fibras naturales harían posible su utilización en otras aplicaciones donde podrían competir con fibras como las de vidrio o carbón por su menor costo relativo, baja densidad y menor huella de carbono. Esto requeriría el desarrollo de nuevos procesos de producción (ver Tabla 1).

Tabla 1.
Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.

Fibra	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a tensión [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Deformación a rotura [%]
Cáñamo	1,48	350-800	30-60	1,6-4,0
Bambú o Guadua	1,4	500-740	30-50	~2
Coco	1,2	150-180	4-6	20-40
Fique	1,04	320	8-14	4
Vidrio	2,5	1200-1800	72	~2,5

Fuente: Van-Vure (2008); Velandia (2008).

Colombia por ser un país con vocación agrícola podría desarrollar esta industria para aprovechar su clima, ubicación y abrir un mercado nuevo a productos tradicionales que están quedando relegados, como la guadua y el fique. Para ello es necesario desarrollar los productos intermedios que faciliten la implementación de estas tecnologías. Estos productos

intermedios, como “mats” en fibras naturales o tejidos “uni” o bidireccionales de fibras naturales facilitarían el crecimiento de la industria de compuestos, dado que el principal inconveniente que se encuentra para implementar estos nuevos materiales es la disponibilidad y los costos accesibles (ver Figura 3) (Midani, 2019).



Figura 3. Partes automotrices fabricadas en compuesto polímero y fibras de coco (Izq).
Carrocería prototipo en fibras de cáñamo en vehículo Tesla (Der)
Fuente: Midani (2019).

Conclusiones

Los productos en WPC tienen potencial en el mercado colombiano, ya que existe disponibilidad de materiales y un mercado de construcción en el que podrían aplicarse. Para generar otros mercados se requiere desarrollar procesos que tomen los productos agrícolas como guadua o fique y lo conviertan en un producto intermedio, de manera similar a como se encuentran los “mats” o telas de fibras de vidrio o carbón que son comerciales actualmente.

Referencias

- Carus, M.; Eder, A.; Dammer, L.; Korte, H.; Scholz, L.; Essel, R.; Breitmayer, E. (2012). *WPC and NFC: European and Global Markets 2012 and Future Trends*. Recuperado de www.bio-based.edu/markets
- Midani, Mohamad (2019). Natural fiber composites: What's holding them back? *Composites World*, 6-8. Recuperado de <https://www.compositesworld.com/blog/post/natural-fiber-composites-whats-holding-them-back>
- Spear, M. J.; Eder, A.; Carus, M. (2015). Wood Polymer Composites. En Ansell, Martin (Ed.). *Wood Composites* (195-249) Elsevier.
- Procolombia. (Julio de 2019). *El mundo invierte en Colombia. Inversión en materiales de construcción*. Recuperado de <https://www.inviertaencolombia.com.co/como-invertir-test/33-sectores/manufacturas/materiales-de-construccion/400-descripcion-del-sector.html>
- Rodríguez-Flórez, César (8 de enero de 2019). *La república: Sector constructor repuntará en 2019 con más inversión y generación de empleo*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/empresas/construccion-repuntara-en-2019-en-cuanto-a-inversion-y-generacion-de-empleo-2812447>
- Van Vuure, Aart (2008). *Natural Fiber Composites: Recent developments*. Recuperado de http://www.i-sup2008.org/presentations/conference_1/vanvuure_aw.pdf
- Velandia, Fabián (2008). *Estimación de módulo de elasticidad en materiales compuestos de matriz polimérica y fibras naturales cortas* (Tesis de grado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Aprovechamiento de residuos de cenizas como carga en materiales compuestos de matrices poliméricas reprocesadas

Use of ash residues as a load in materials composed of reprocessed polymer matrices

Modalidad: Póster

Lina Marcela Crespo¹
Carolina Caicedo²
Juan Camilo González³

¹ Grupo de investigación en desarrollo de materiales y productos, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN-SENA), Cali, Colombia. Email: lmcrespo3@misena.edu.co

² Grupo de investigación en desarrollo de materiales y productos, Centro Nacional de Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN-SENA), Cali, Colombia. Email: carolina.caicedo@gmail.com

³ Centro Asistencia Técnica a la Industria (ASTIN), SENA, Calle 52 Bis -15, Complejo Salomia, Cali, Valle del Cauca, Colombia. Email: jcgonzalez860@misena.edu.co

La mayoría de los estudios sobre la modificación de polímeros semicristalinos con partículas rígidas indican una pérdida significativa de tenacidad en comparación con el polímero puro (Eftekhar; Fatemi, 2016). Las partículas rígidas deben despegarse y crear un volumen libre en la mezcla en un nivel de tamaño submicrónico, el cual se explica con el mecanismo de cavitación en los sistemas de caucho endurecido (Tang *et al.*, 2013). A través del tiempo, las cargas más utilizadas en polipropileno han sido el carbonato de calcio y el talco (Caicedo; Vázquez-Arce; Ossa; De La Cruz; Maciel-Cerda, 2018), sin embargo, en la actualidad se continúan estudiando alternativas para el aprovechamiento de cargas inorgánicas procedentes de la degradación fisicoquímica, térmica o biológica de residuos agrícolas como es el caso de las cenizas (Pongdong; Kummerlöwe; Vennemann; Thitithammawong; Nakason, 2016). La cascarilla de arroz es uno de los principales productos de residuo agrícola, según los datos estadísticos de la FAO, la producción mundial de arroz fue de aproximadamente 756,7 millones de toneladas en 2017 (FAO, 2018), así mismo, en Colombia el DANE reportó una producción de 989.959 toneladas para el primer semestre de 2017. Por lo anterior, la cascarilla de arroz es un subproducto de gran interés para los investigadores y productores debido al reto que se tiene por ofrecer materiales que generen valor agregado a este residuo.

En la literatura se reporta una serie de estudios sobre compuestos de polímero y cascarilla de arroz (Rozman; Yeo; Tay; Abubakar, 2003), uno de los rellenos favoritos después del aceite de palma y el caucho, así como; el producto de la incineración: la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) compuesta principalmente por sílice entre 87-97 % (Premalal; Ismail; Baharin, 2003). Algunos resultados obtenidos muestran incremento del 18 % en resistencia mecánica y alargamiento a rotura de compuestos de polietileno de alta densidad (HDPE) con CCA incorporada en 1,5 % en peso en presencia de anhídrido maléico como agente de acoplamiento (Batteggazzore; Bocchini; Alongi; Frache, 2014). En otra investigación, se obtuvo mejora del módulo de tensión en compuestos de ceniza de cascarilla de arroz blanco (CCAB) con polipropileno (PP)/caucho natural, sin embargo, la resistencia a la tensión, el alargamiento a la rotura disminuyeron al aumentar la carga de CCAB, mientras que la incorporación del agente de acoplamiento (silano, 3-aminopropil trietoxisilano), redujo la cantidad de agua absorbida por el material compuesto (Batteggazzore; Bocchini; Alongi; Frache, 2014). De esta forma, el ciclo de vida de un producto depende en gran medida de su reutilización y facilidad de reciclaje. En este trabajo se presenta el desarrollo de materiales compuestos de polipropileno reprocesados con cenizas de cascarilla de



arroz (RHA) y cenizas de bagazo de caña de azúcar (SBA) a través de los procesos de coextrusión e inyección. La matriz polimérica fue reprocesada hasta seis generaciones por la técnica de inyección. El PP reprocesado se mezcló en proporciones 80:20 con respecto a la carga mineral, usando anhídrido maleico como agente de acoplante en una co-extrusora doble husillo. Se analizó la nueva serie de materiales compuestos térmica, mecánica, reológica y morfológicamente. La incorporación de cenizas en la matriz de PP logró características de resistencia a la tracción mejorada, conservando las propiedades térmicas. Por este motivo, este trabajo presenta una alternativa para la fabricación de materiales compuestos a partir de residuos post-industriales (Crespo; Caicedo, 2019).

Bibliografía

- Eftekhari, M.; Fatemi, A. (2016). Creep-fatigue interaction and thermo-mechanical fatigue behaviors of thermoplastics and their composites. *International Journal of Fatigue*, 91, 136-148.
- Tang, L. C.; Wang, X.; Wan, Y. J.; Wu, L. B.; Jiang, J. X.; Lai, G. Q. (2013). Mechanical properties and fracture behaviors of epoxy composites with multi-scale rubber particles. *Materials Chemistry and Physics*, 141(1), 333-342.
- Caicedo, C.; Vázquez-Arce, A.; Ossa, O. H.; De La Cruz, H.; Maciel-Cerda, A. (2018). Physicomechanical behavior of composites of polypropylene, and mineral fillers with different process cycles. *Dyna*, 85(207), 260-268.
- Pongdong, W.; Kummerlöwe, C.; Vennemann, N.; Thitithammawong, A.; Nakason, C. (2016). A comparative study of rice husk ash and siliceous earth as reinforcing fillers in epoxidized natural rubber composites. *Polymer Composites*, 39(2), 414-426.
- FAO(27deabrilde2018).ComercioymercadosSeguimientodelMercadodelArrozde laFAO(SMA).Recuperadode <http://www.fao.org/economic/est/publications/publicaciones-sobre-el-arroz/seguimiento-del-mercado-del-arroz-sma/es/>
- Rozman, H. D.; Yeo, Y. S.; Tay, G. S.; Abubakar, A. (2003). The mechanical and physical properties of polyurethane composites based on rice husk and polyethylene glycol. *Polymer Testing*, 22(6), 617-623.
- Premalal, H. G.; Ismail, H.; Baharin, A. (2003). Effect of Processing Time on the Tensile, Morphological, and Thermal Properties of Rice Husk Powder-Filled Polypropylene Composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(5), 827-851.
- Battegazzore, D.; Bocchini, S.; Alongi, J.; Frache, A. (2014). Rice husk as bio-source of silica: preparation and characterization of PLA-silica bio-composites. *RSC Advances*, 4(97), 54703-54712.
- Pongdong, W.; Kummerlöwe, C.; Vennemann, N.; Thitithammawong, A.; Nakason, C. (2016). Property correlations for dynamically cured rice husk ash filled epoxidized natural rubber/thermoplastic polyurethane blends: Influences of RHA loading. *Polymer Testing*, 53, 245-256.
- Crespo, L. M.; Caicedo, C. (2019). Application of ashes as filling in reprocessed polypropylene: thermomechanical properties of composites. *Polímeros*, 29(1).

Comportamiento ablativo de compuestos de matriz polimérica y su aplicación en el campo aeroespacial

Ablative behavior of polymer matrix compounds and their application in the aerospace field

Modalidad: Comunicación oral

Rafael Robayo-Salazar¹
Julian Portocarrero Hermann¹
Ubaldo Díaz Padrón¹
Oscar Patiño Castrillón¹

¹ Fuerza Aérea Colombiana, Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" (EMAVI), Programa de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA), Cl. 54 #8b-16, Cali, Colombia. * autor de correspondencia: rarobayos@emavirtual.edu.co

Resumen

Los materiales ablativos son la base de los sistemas de protección térmica comúnmente utilizados en el campo aeroespacial. Dentro de este grupo, los compuestos de matriz polimérica se destacan por su baja densidad y su desempeño a elevadas temperaturas está determinado por los tipos de refuerzos incorporados en la matriz; la cual por lo general corresponde a resinas de tipo fenólico, epóxico o poliéster. Esta investigación describe el comportamiento ablativo (1600-2000 °C) de compuestos basados en resina poliéster (30 %) reforzada con sub-productos industriales finamente molidos (*fillers*) (escoria siderúrgica, escoria de fundición, escoria de aluminio y residuo cerámico) (67 %) y fibras cortas de vidrio (3 %). Los resultados obtenidos demostraron la posibilidad de obtener compuestos ablativos a partir de materiales de fácil adquisición útiles para la fabricación de componentes de propulsión de interés para la industria aeroespacial nacional.

Palabras clave: compuestos ablativos, sistemas de protección térmica, sub-productos industriales, resina poliéster, fibra de vidrio.

Introducción

Los materiales ablativos y sistemas de protección térmica juegan un papel determinante en el desarrollo de la industria aeroespacial, especialmente en el campo de la cohetaría. El motor cohete, compuesto por la cámara de combustión, propulsores y/o boquillas, debe diseñarse para soportar temperaturas de operación superiores a los 1600-2000 °C en un ambiente ablativo severo. Normalmente, el motor cohete es fabricado por mecanizado de aleaciones de acero, aluminio o titanio y recubierto internamente con sistemas de protección térmica, dentro de los cuales se destacan los metales de alto punto de fusión (tungsteno, renio y molibdeno) y compuestos cerámicos refractarios (carburos de silicio (SiC), circonio (ZrC), boro (B₄C) o hafnio (HfC)) (Natali; Kenny; Torre, 2016). La desventaja de estos materiales es su difícil adquisición y costo elevado, lo que dificulta el desarrollo del campo de la cohetaría y su aplicación en países como Colombia, siendo la búsqueda de materiales alternativos con mayor relación desempeño/densidad una de las prioridades para este sector. Dentro de las alternativas se destacan los materiales compuestos ablativos de matriz polimérica (CAMP), en gran parte debido a su versatilidad, bajo costo y la posibilidad de reducir el peso de estos componentes (Astola; Rodríguez; Botana; González-Rovira, 2017; Pulci *et al.*, 2018). Esta investigación se enfoca en el desarrollo y caracterización de CAMP basados en una matriz de resina poliéster (30 %) reforzada con materiales particulados (*fillers*: escoria siderúrgica, escoria de fundición, escoria de aluminio y residuo cerámico) (67 %) y fibras cortas de vidrio (3 %), destacando que los *fillers* corresponden a residuos o sub-productos industriales, para su aplicación potencial en la fabricación de componentes de propulsión.



Materiales y Métodos

Los CAMP se fabricaron a partir de la mezcla de 30 % resina poliéster comercial (in-saturada y pre-acelerada), 67 % material particulado (*fillers* $\approx 75\mu\text{m}$) y 3 % fibra corta de vidrio (4 mm). La dosificación de los *fillers* se realizó con base a un diseño de mezclas de vértices extremos de 4 componentes (escoria siderúrgica (ES); escoria de aluminio (EA); escoria de fundición (EF); y residuo cerámico (RC)) y 9 puntos de interacción aleatorizados (ver Tabla 1). Los compuestos fueron mezclados, moldeados en placas de 19,5 x 13,5 x 0,5 cm (largo, ancho y espesor) y curados a 60 °C durante 6 horas. Las placas fueron sometidas a un ensayo ablativo siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E285 (llama directa; 1600-2000 °C durante ~120 s) (ASTM International, 2015) utilizando un soplete (antorcha) de gas propileno-propano MAP-PRO Worthington. La temperatura de la cara opuesta a la llama fue medida adhiriendo un termopar a su superficie. La inspección de la zona térmicamente afectada y la evaluación del nivel de degradación del compuesto optimo se realizó por medio un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL JSM-6490LV. Con base en los resultados obtenidos se eligió el CAMP óptimo para la fabricación del motor de propulsión de un cohete de sondeo (tipo sonda), el cual fue sometido a una prueba de combustión real utilizando un propelente solido tipo Candy KNSU. Durante la prueba se realizó un seguimiento termográfico del motor-cohete utilizando una cámara FLIR T540 para validar el desempeño térmico del material.

Tabla 1.

Composición de los compuestos ablativos de matriz polimérica (fracción en peso de cada material)

Compuesto	Resina	Fillers				Fibra de vidrio
		ES	EA	EF	RC	
1	0,30	0,000	0,000	0,000	0,670	0,03
2	0,30	0,670	0,000	0,000	0,000	0,03
3	0,30	0,000	0,670	0,000	0,000	0,03
4	0,30	0,000	0,000	0,670	0,000	0,03
5	0,30	0,168	0,168	0,168	0,168	0,03
6	0,30	0,084	0,084	0,084	0,419	0,03
7	0,30	0,419	0,084	0,084	0,084	0,03
8	0,30	0,084	0,419	0,084	0,084	0,03
9	0,30	0,084	0,084	0,419	0,084	0,03

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusiones

La Figura 1 muestra la temperatura registrada en la cara opuesta a la incidencia de la llama durante el ensayo de ablación térmica. Teniendo en cuenta que la temperatura de la llama es de 1600-2000 °C, los CAMP presentaron un nivel de aislamiento superior al 65 %. Entre estos se destaca el desempeño reportado por los CAMP 1, 2 y 5, los cuales reportaron temperaturas en la cara opuesta inferiores a los 250 °C durante los 120 segundos de ensayo. Para el caso del CAMP 2 esta temperatura no superó los 150 °C, siendo el mejor desempeño entre los compuestos desarrollados. El rango de temperaturas de la llama incidente simula la condición térmica de operación al interior del motor de propulsión de un cohete de sondeo (tipo sonda). Sin embargo, el procedimiento llevado a cabo se considera más severo, dado que la incidencia de la llama durante el ensayo ablativo es frontal o perpendicular a la placa, a diferencia de la incidencia tangencial que ocurre al interior de un motor-cohete.

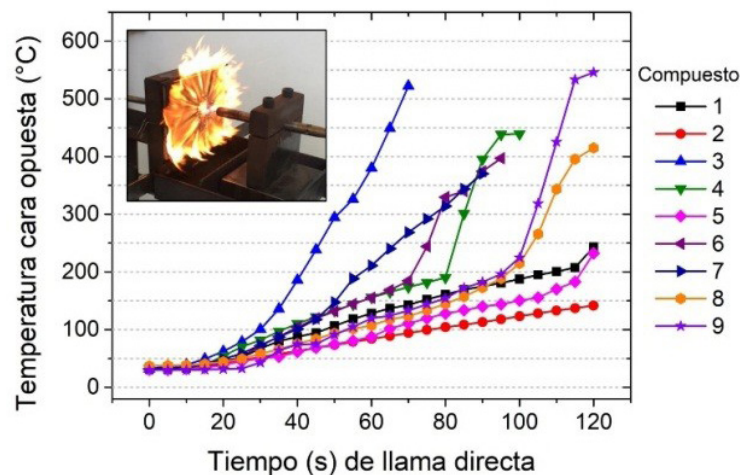


Figura 1. Curva de temperatura en la cara opuesta vs. tiempo de ensayo ablativo
Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 presenta la observación microscópica realizada a la zona afectada por el calor en el CAMP 2 (óptimo), en donde se resalta la formación de una capa carbonizada en la superficie y la importancia de la fibra de vidrio en el control de agrietamiento del compuesto. En efecto, cuando los CAMP son expuestos a temperaturas por encima del límite de degradación térmica de la matriz (resina), su estructura experimenta un fenómeno de pirólisis y se produce una capa carbonizada; al respecto, esta capa es considerada un material de alto desempeño ablativo (Natali *et al.*, 2016; Rallini; Natali; Torre, 2019). Junto con la fibra de vidrio, esta capa carbonizada retiene los *fillers* incorporados y el proceso de ablación se lleva a cabo de manera efectiva, ya que el sistema continua absorbiendo calor endotérmicamente (Pulci *et al.*, 2018). Aun considerando las propiedades ablativas de esta capa, el residuo carbonizado puede erosionarse o sufrir delaminación a tiempos de exposición prolongados, afectando el desempeño y rendimiento ablativo del material. Por esta razón es indispensable reforzar el compuesto con fibras cortas, cuyo efecto se puede corroborar en la Figura 2.

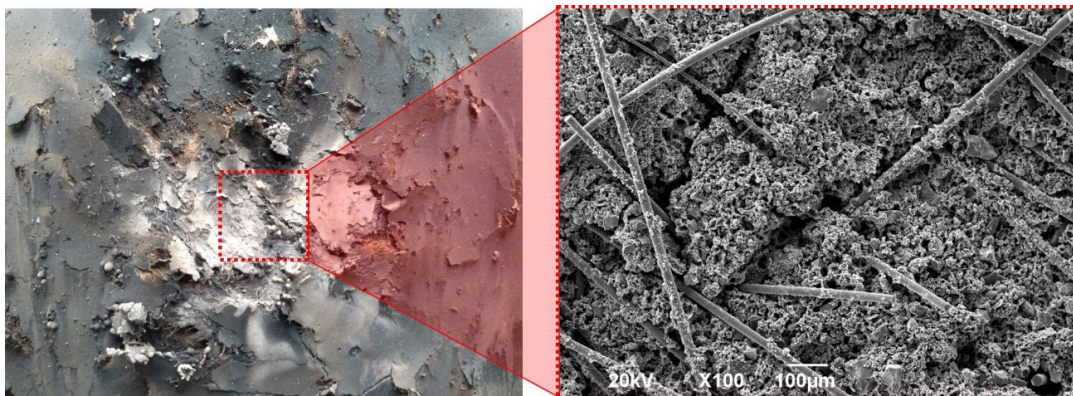


Figura 2. Observación microestructural de la zona térmicamente afectada y comportamiento ablativo del CAMP 2
Fuente: elaboración propia.

Con base en los desempeños reportados durante el ensayo de llama directa, se eligió el CAMP 2 (67 % ES) como el material óptimo, a partir del cual se fabricó una aplicación tipo tobera (boquilla) de motor cohete, la cual a su vez fue sometida a una prueba de combustión real para validar su aplicación en la fabricación de componentes de propulsión. En efecto, la Figura 3 muestra el montaje de la prueba y el perfil térmico alcanzado por la aplicación bajo condiciones reales de servicio, en donde se puede apreciar que la temperatura registrada en la superficie de la tobera no superó los 150 °C hasta los 90 s de prueba, en concordancia con el nivel de aislamiento térmico y desempeño ablativo reportado durante la prueba de llama directa (ver Figura 1). Este resultado valida finalmente el potencial de aplicación que tienen los CAMP

en el campo aeroespacial, en donde la búsqueda de materiales de elevados desempeños y baja densidad es constante. Al respecto, al comparar la densidad del CAMP 2 ($1,95 \text{ g/cm}^3$), con la de otros materiales comúnmente utilizados en la fabricación de motores cohetes, tales como las aleaciones de acero ($7,84 \text{ g/cm}^3$), aluminio ($2,79 \text{ g/cm}^3$) o titanio ($4,60 \text{ g/cm}^3$) (Suton; Biblarz, 2010), se puede resaltar la importancia de este desarrollo y la posibilidad de reducir el peso de la aplicación final. A lo que se le puede sumar el hecho de que los CAMP desarrollados en esta investigación se componen en un 67 % de residuos o sub-productos industriales y materiales de fácil adquisición (bajo costo) como la resina poliéster (30 %) y la fibra de vidrio (3 %).

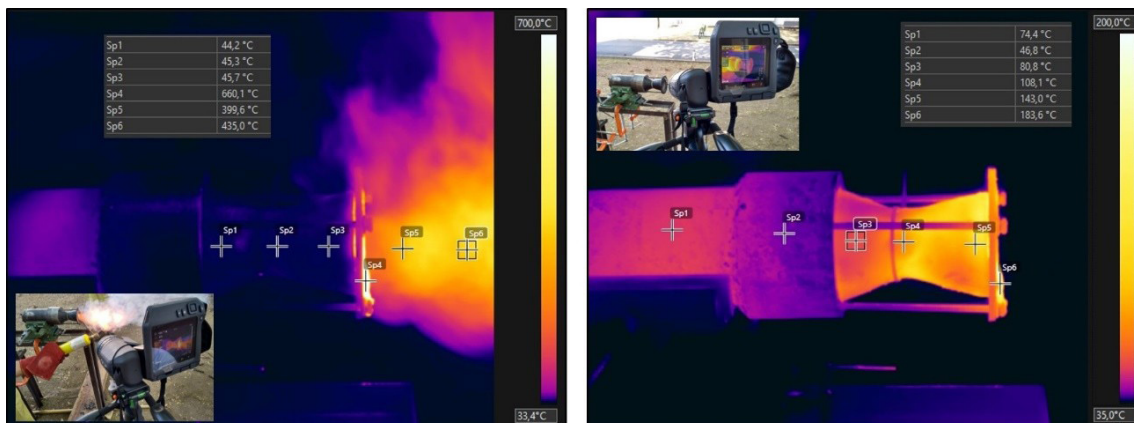


Figura 3. Prueba estática de combustión real del motor cohete fabricado con el compuesto ablativo optimo (CAMP 2)
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Se demostró la posibilidad de obtener compuestos de matriz polimérica con elevados desempeños ablativos incorporando altos contenidos (67 %) de residuos o sub-productos industriales. Estos materiales reportaron niveles de aislamiento térmico superiores al 65 %, resistiendo temperaturas de entre $1600\text{--}2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados obtenidos se consideran de suma importancia para la producción local de sistemas de protección térmica o compuestos ablativos de baja densidad con materiales de fácil adquisición y bajo costo, lo cuales pueden ser aplicados en la manufactura de componentes de propulsión como las toberas de los cohetes de sondeo o tipo sonda que la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) pretende desarrollar en el país, con poca dependencia tecnológica externa, para fines científicos, tecnológico y militares.

Agradecimientos

Al Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez” (EMAVI), a la sección de investigaciones de la EMAVI y al Laboratorio de Servicios Tecnológicos (SENNOVA) del Centro de Electricidad y Automatización Industrial (CEAI) del SENA (regional Valle del Cauca) por el soporte instrumental durante las pruebas termográficas.

Referencias

- ASTM International. (2015). *ASTM E285, Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation materials*.
<https://doi.org/10.1520/E0285-08R15>

- Astola, P. J.; Rodríguez, M. A.; Botana, F. J.; González-Rovira, L. (2017). Caracterización de elementos de protección térmica de materiales compuestos mediante análisis térmicos. *Revista de La Asociación Española de Materiales Compuestos*, 2(4), 34–41.
- Natali, Maurizio; Kenny, Jose; Torre, Luigi (2016). Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices : A review. *Progress in Materials Science*, 84, 192–275. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.003>
- Pulci, G.; Paglia, L.; Genova, V.; Bartuli, C.; Valente, T.; Marra, F. (2018). Low density ablative materials modified by nanoparticles addition: Manufacturing and characterization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.025>
- Rallini, Marco; Natali, Maurizio; Torre, Luigi (2019). An Introduction to Ablative Materials and High-Temperature Testing Protocols. En Yan, Qi-Long; He, Guo-Qiang; Liu, Pei-Jin; Gozin, Michael (Eds.). *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems* (529–549). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813908-0.00014-9>
- Suton, Gerge; Biblarz, Oscar (2010). *Rocket Propulsion Elements* (Eighth Edi). New Jersey: John Wiley & Sons, INC.