

Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption

Cindy Gutiérrez-Estupiñán; José Gutiérrez-Gallego; Melba Sánchez-Soledad

Citación: C. Gutiérrez-Estupiñán, J. Gutiérrez-Gallego, M. Sánchez-Soledad, "Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10489, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10489>

Recibido: Noviembre 05, 2019; **Aceptado:** Diciembre 31, 2019;

Publicado: Enero 01, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption

Cindy Gutiérrez-Estupián¹

José Gutiérrez-Gallego²

Melba Sánchez-Soledad³

Abstract

The overproduction of plastics and the wide availability of natural fibers that become a source of contamination before ending their useful life, in a context of environmental crisis, has led researchers to study how to integrate them into the production of biocomposites. For this project, the development of a composite material that integrated expanded post-consumer polystyrene (EPS) and palm fiber (OPEFB) was proposed. OPEFB fibers were obtained from palm growers in the region, being processed by drying, grinding and sieving with a particle size (Mesh of 30, 40, 50, 60 and 70). To obtain the solvent of the EPS, a volume of orange essential oil (*Citrus sinensis*) was distilled off by steam and the amount of d-limonene present was quantified using the gas chromatography technique coupled to mass spectrometry. Subsequently, the EPS was dissolved and a solubility of 0.5 g/mL was reached and with this volume a 1:2 water/EPS-Citrus Sinensis emulsion was formulated which was characterized using the optical microscopy technique and two dyes of different polarity to observe its affinity with both phases, allowing it to be

¹ Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga-Santander, Colombia). cindy.gutierrez@correo.uis.edu.co. ORCID: [0000-0003-0919-1619](https://orcid.org/0000-0003-0919-1619).

² M. Sc. Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga-Santander, Colombia). jcgutier@uis.edu.co. ORCID: [0000-0002-2100-6060](https://orcid.org/0000-0002-2100-6060).

³ M. Sc. Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga-Santander, Colombia). melbasan@uis.edu.co. ORCID: [0000-0003-1135-4595](https://orcid.org/0000-0003-1135-4595).

classified as a W/O type macroemulsion. The agglomerates were made by a process of molding, pressing and heating for baking. All the above parameters were kept constant and only the fiber size varied. The tests of resistance to compression and hardness showed that, to a smaller fiber size, less hardness, resistance to compression and stiffness, so the specimens made with mesh fibers (Mesh) No. 40 showed better performance in mechanical tests.

Keywords: chemical recycling; *citrus sinensis*; fiber reinforced plastics; OPEFB; recycled EPS.

Elaboración de un material compuesto a partir de fibras de palma de aceite y una emulsión ecológica de poliestireno expandido post-consumo

Resumen

La sobreproducción de plásticos y la amplia disponibilidad de fibras naturales que se convierten en un foco de contaminación antes de terminar su vida útil, en un contexto de crisis ambiental, ha hecho que los investigadores estudien la manera de integrarlos en la producción de biocompuestos. Para este proyecto se planteó la elaboración de un material compuesto que integrara poliestireno expandido post-consumo (EPS) y raquis de palma (OPEFB). Las fibras OPEFB se consiguieron a partir de palmicultoras de la región, procesándose mediante secado, molienda y tamizado con una granulometría (Mesh de 30, 40, 50, 60 y 70). Para obtener el solvente del EPS se destiló por arrastre de vapor un volumen de aceite esencial de naranja (*Citrus sinensis*) y se cuantificó la cantidad de d-limoneno presente usando la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Posteriormente, se disolvió el EPS y se alcanzó una solubilidad de 0.5 g/mL y con un volumen de 1 L se formuló una emulsión 1:2 agua/EPS-*Citrus Sinensis* que fue caracterizada usando la técnica de microscopía óptica y dos colorantes de distinta polaridad para observar su afinidad con ambas fases, permitiendo clasificarla como una macroemulsión de tipo W/O. Los aglomerados se elaboraron mediante un proceso de moldeo, prensado y calentamiento. Se mantuvieron constantes todos los parámetros anteriores y sólo varió el tamaño de la fibra. Los ensayos de resistencia a la compresión y dureza mostraron que, a menor tamaño de fibra,

menor dureza, resistencia a compresión y rigidez, por lo que las probetas elaboradas con fibras de malla (Mesh) No. 40 mostraron mejor desempeño en los ensayos mecánicos.

Palabras clave: *citrus sinensis*; EPS reciclado; OPEFB; plásticos reforzados con fibra; reciclaje químico.

Elaboração de um material composto a partir de fibras de palma de óleo e uma emulsão ecológica de poliestireno expandido post-consumo

Resumo

A superprodução de plásticos e a ampla disponibilidade de fibras naturais que se convertem em um foco de contaminação antes de terminar sua vida útil, em um contexto de crise ambiental, tem feito com que os pesquisadores estudem a maneira de integrá-los na produção de biocomponentes. Para este projeto planteou-se a elaboração de um material compósito que integrasse poliestireno expandido post-consumo (EPS) e raques de palma (OPEFB). As fibras OPEFB conseguiram-se a partir de cultivadores de palma da região processando-se mediante secado, moagem e tamisado com uma granulometria (Mesh de 30, 40, 50, 60 e 70). Para obter o solvente do EPS destilou-se por arrastre de vapor um volume de óleo essencial de laranja (*Citrus sinensis*) e quantificou-se a quantidade de d-limoneno presente usando a técnica de cromatografia de gases acoplada a espectrometria de massas. Posteriormente, dissolveu-se o EPS e alcançou-se uma solubilidade de 0.5 g/mL e com um volume de 1 L formulou-se uma emulsão 1:2 água/EPS-Citrus Sinensis que foi caracterizada usando a técnica de microscopia óptica e dois colorantes de distinta polaridade para observar sua afinidade com ambas fases, permitindo classificá-la como uma macroemulsão de tipo W/O. Os aglomerados elaboraram-se mediante um processo de moldagem, prensado e aquecimento. Mantiveram-se constantes todos os parâmetros anteriores e só variou o tamanho da fibra. Os ensaios de resistência à compressão e dureza mostraram que, quanto menor é o tamanho da fibra, menor é a dureza, a resistência à compressão e a rigidez, pelo que as probetas elaboradas com fibras de malha (Mesh) No. 40 mostraram melhor desempenho nos ensaios mecânicos.

Palavras chave: citrus sinensis; EPS reciclado; OPEFB; plásticos reforçados com fibra; reciclagem química.

I. INTRODUCCIÓN

La ciencia y la tecnología de materiales se han apuntado importantes logros con el desarrollo de los biocompuestos [1], que son elaborados mediante la combinación de fibra natural y plástico no biodegradable derivado del petróleo. El uso de estas fibras como refuerzo de materiales compuestos es una alternativa para extender su vida útil y mejorar la gestión de residuos. Entre sus ventajas se encuentra que son livianas; de menor costo; baja densidad; no son tóxicas, ni abrasivas para el producto involucrado; no irritantes; reducen el consumo de energía; no afectan el desgaste de la herramienta; facilitan el procesamiento y absorción de CO₂ durante su crecimiento, renovabilidad, reciclabilidad y biodegradabilidad [2]. Una de las características más importantes es que pueden eliminarse fácilmente al final de su ciclo de vida mediante el compostaje o la recuperación de su valor calorífico. Sin embargo, las fibras naturales también exhiben algunas características indeseables como la alta absorción de humedad, la baja resistencia térmica y las propiedades altamente anisotrópicas [3].

La incorporación de plásticos en este tipo de materiales contribuye a resolver un problema ambiental ocasionado por su descontrolada producción e irresponsable disposición final, haciendo que su naturaleza estable y la dificultad para ingresar en los ciclos de degradación de la biosfera se conviertan en una enorme desventaja en su fase postconsumo [4]. Uno de los plásticos más problemáticos es el poliestireno expandido (EPS). A diferencia de otros, este no se recicla usualmente por su nula rentabilidad debido a que un 98% de su composición es aire y tan solo el 2% restante es poliestireno que se puede recuperar [5-7]. Buscando un disolvente apropiado para el EPS, se encontró en un estudio [8] que el d-limoneno presenta una buena solubilidad y es posible obtenerlo de distintas fuentes, incluyendo los aceites esenciales de algunos cítricos. Sin lugar a duda, la combinación de la agricultura, la industria de los polímeros y la ciencia e ingeniería de los materiales para desarrollar nuevos productos con un buen desempeño costo-beneficio es fundamental para encontrar salidas masivas y eficientes.

La agroindustria es también uno de los sectores que produce grandes cantidades de desechos. En Colombia hay más de 120000 ha de plantaciones de palma

aceitera africana, perteneciente a la especie *Elaeis guineensis* y a la familia *Palmaceae*. Su producción no es totalmente eficiente y la imparable expansión de su cultivo genera enormes cantidades de restos vegetales que causan problemas ambientales y de salud pública, haciendo que sea necesario buscar una salida para todos los subproductos del proceso de extracción de aceite, donde se produce un 25% de raquis o racimo vacío de fruta de aceite de palma (OPEFB). Sus fibras están compuestas principalmente por celulosa y en menor cantidad por lignina y hemicelulosa [9]. Los compuestos poliméricos a partir de materiales lignocelulósicos llaman la atención por su bajo costo y la diversidad de sus aplicaciones. En cuanto a sus propiedades con respecto a sus homólogos inorgánicos, se destaca una menor densidad, mayor deformabilidad, menor abrasividad, alta rigidez, reducción de alergias dérmicas y respiratorias, buenas propiedades térmicas, menor costo, entre otras [10-19].

En general, los compósitos están formados por dos o más materiales de diferente naturaleza que, combinados, tienen un efecto sinérgico. La matriz y el refuerzo son sus constituyentes principales [20]. Algunos estudios demuestran la posibilidad de formular una emulsión ecológica de EPS como aglomerante [21-24], siendo ésta, por definición, un sistema constituido por dos fases líquidas inmiscibles, en donde una de ellas se dispersa a través de la otra en forma de gotas muy pequeñas, cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante [25]. El tipo de emulsionante aplicado depende del método de mezcla y de la duración de la estabilidad que se desee [26]. En el caso de las emulsiones W/O (del inglés Water/Oil), si la película tiene una mayor afinidad por el agua que por el aceite, la tensión superficial será menor en el lado más polar. La película tenderá a curvarse, buscando una reducción de esta fuerza en el sistema. Al reducirla en el lado exterior y al aumentarla hacia el interior, forma glóbulos de menor polaridad dispersos en una fase acuosa. Para las emulsiones O/W (del inglés Oil/Water) ocurrirá el fenómeno contrario.

En este proyecto de investigación se planteó la elaboración de un material compuesto que integra el EPS post-consumo en una matriz polimérica usando *Citrus sinensis* para formar una emulsión que aglomere las fibras previamente

tratadas de raquis de palma y ofrecer una alternativa ecológica para alargar la vida útil de estos desechos.

II. METODOLOGÍA

A. Preparación del material

El material vegetal fue facilitado por Palmas del Cesar y Bucarelia. Se lavó con agua para remover hongos y polvo. Fue secado a temperatura ambiente durante cuatro meses y sometido a molienda usando un molino de martillos (núcleo de 4 martillos afilados con motor de 5 HP). Las fibras se calentaron a 105°C durante 4 horas para eliminar humedad y se tamizó (Portable Sieve Shaker Model RX-24) para obtener distintas granulometrías (Mallas No.30, No.40, No.50, No.60 y No.70). Cada fracción se almacenó en una bolsa sellable.

B. Formulación de la emulsión

Para la elección del solvente del EPS se tuvo en cuenta su carácter ecológico, baja toxicidad, baja presión de vapor para facilitar su eliminación en el aglomerado, económico, amplia disponibilidad y alta solubilidad estudiados para el poliestireno extruido (XPS) (Tabla1) [8]. Al revisar la ficha técnica de todos ellos se descartaron los cinco primeros de la tabla por su toxicidad y peligrosidad para el medio ambiente. El solvente escogido fue el d-limoneno que se encuentra de manera natural en los aceites esenciales cítricos y es más fácil de conseguir comercialmente que el p-cimeno.

Tabla 1. Solubilidad del XPS a 25°C en distintos solventes.

Solvente	Solubilidad del XPS
Benceno	0.68
Tolueno	0.60
Xileno	0.40
Tetrahidrofurano	0.96
Cloroformo	1.28
d-limoneno	0.26
p-cimeno	0.30

Se obtuvo un volumen de *Citrus sinensis* destilado por arrastre de vapor y se compró 1 L de *Citrus reticulata* (aceite esencial de mandarina), cuyos análisis de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (GC/MS) muestran una concentración de d-limoneno del 99.3% y del 98.2%, respectivamente. Por su rentabilidad y disponibilidad, ampliamente estudiadas por la Dra. Stashenko y su equipo de trabajo [27], se usó el *Citrus sinensis* a partir del cual se formuló la emulsión ecológica compuesta por un 50% m/m de agua, a partir de una disolución con relación 1:2 de EPS y solvente. Para su caracterización se usaron dos colorantes comerciales de distinta polaridad para elucidar el tipo de emulsión según sus fases bajo la técnica de microscopía óptica (Hirox KH 7700) que también permitió clasificarla según el tamaño de las micelas.

C. Elaboración de aglomerados

Las probetas para todas las pruebas se elaboraron por triplicado mezclando las fibras y la emulsión en una relación 1:3 con un peso de 30 g en total. El molde es cilíndrico de dimensiones internas de 2 pulgadas de alto y 1 pulgada de diámetro que se ajustan a la norma ASTM D695. Se aplicó una presión de 20 MPa con una prensa hidráulica antes del calentamiento y dentro del molde se apretó el émbolo hasta la medida de 2 pulgadas. Posteriormente, cada triplicado se llevó a calentamiento en un horno Memmert 110 que fue precalentado antes de ingresar las probetas durante 4 horas a 160°C y enfriadas a temperatura ambiente antes de desmoldar. Se mantuvo constante la presión y la temperatura en todas las probetas y se tomó como variable el parámetro del tamaño de la fibra.

D. Caracterización de los aglomerados

Para la caracterización mecánica se realizó un ensayo de resistencia a la compresión a cada triplicado de probetas (equipo de ensayos universales HSM 58 Universal Material Tester de 20 KN) bajo la Norma ASTM D695 y una prueba de dureza con un durómetro digital Shore tipo D (Norma ASTM 2240).

III. RESULTADOS

La caracterización de la emulsión por microscopía óptica arrojó que el colorante líofilo tiñe la fase continua de la emulsión y el colorante hidrófilo el interior de las micelas (Figura 1).

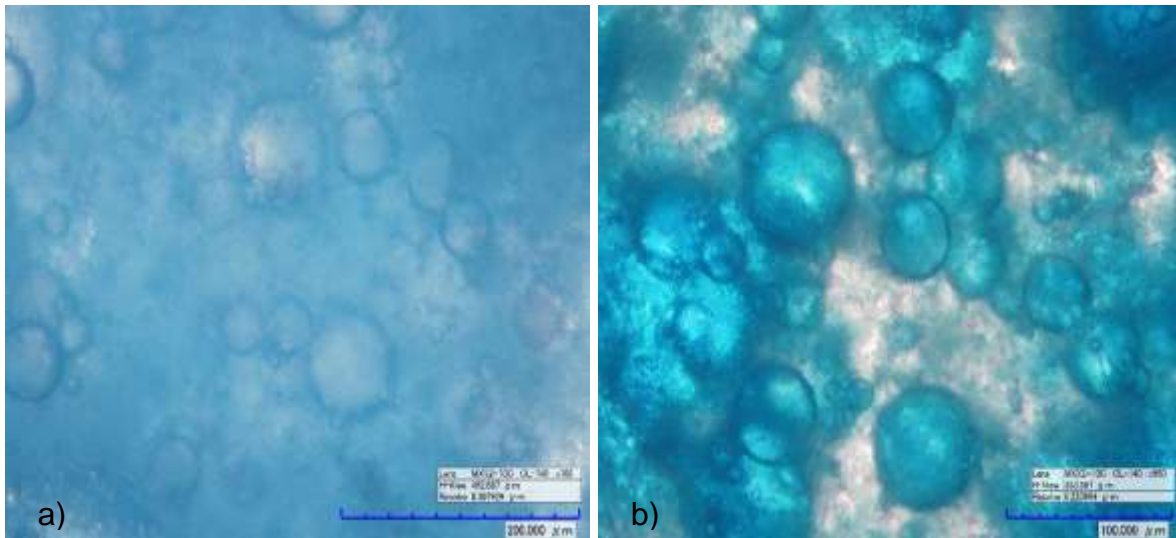


Fig.1. Micrografías a 980X de la emulsión usando colorantes de distinta naturaleza polar. a) Emulsión con colorante líofilo. b) Emulsión con colorante hidrófilo.

Para clasificar la emulsión según su tamaño de partícula se toman micrografías en cinco puntos diferentes de diez muestras y se mide el diámetro de algunas micelas (Figura 2). Las marcas micrográficas registran un rango entre 0.2 y 50 μm de radio.

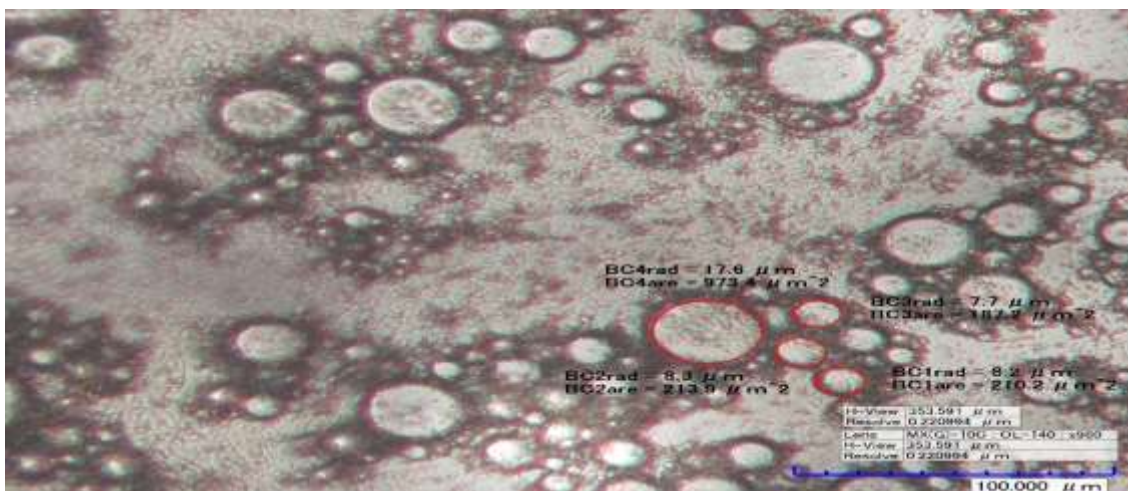


Fig. 2. Micrografías de la emulsión sin colorantes con medición de micelas.

El ensayo de resistencia a la compresión (Figura 3) arrojó una curva esfuerzo-deformación, de la cual fue posible calcular el Módulo de Young (Figura 4) para cada una de las probetas por triplicado.

Cada probeta se deforma hasta la rotura con una prensa hidráulica que imprime una fuerza de compresión que aumenta gradualmente. Se observa un comportamiento plástico de las probetas, es decir, el material no regresa a su forma original.

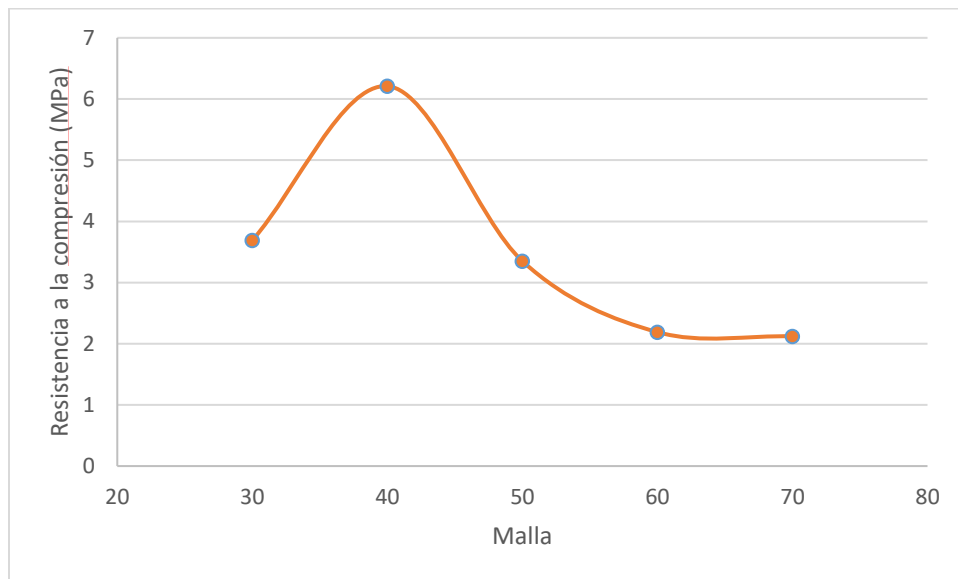


Fig. 3. Resistencia a la compresión según granulometría de las fibras.

El módulo de elasticidad de un material, definido como la mayor o menor capacidad de deformarse bajo tensiones. Puede ser interpretado como la rigidez, es decir, su resistencia a la deformación elástica, de tal modo que cuanto mayor es su valor, más rígido es el material y existe una mejor distribución de esfuerzos. Se obtuvo ampliando la zona inicial de la curva de esfuerzo-deformación y extrayendo su pendiente.

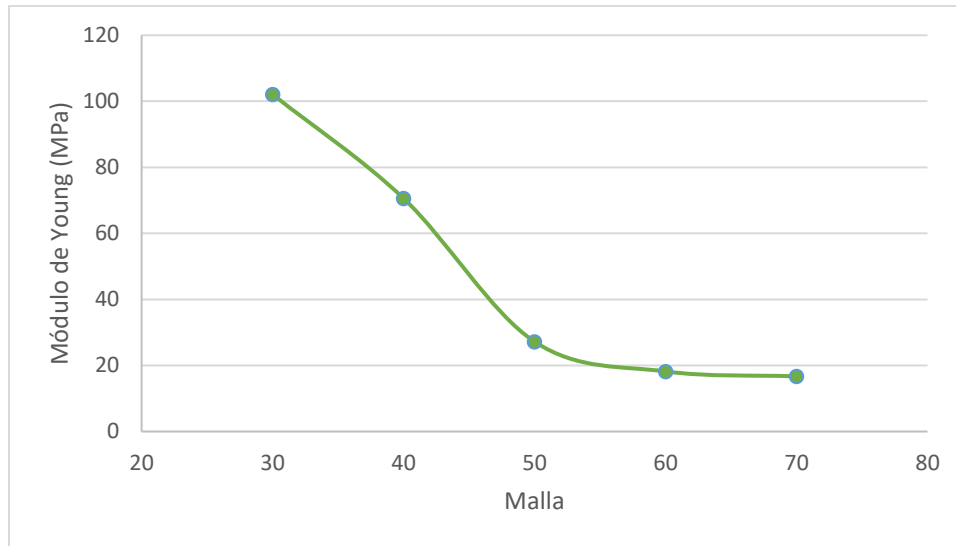


Fig. 4. Relación entre el módulo de Young y la granulometría de las fibras.

Se realizó también un ensayo de dureza Shore tipo D bajo la norma ASTM 2240 con el que se obtuvo una curva en relación con la granulometría de las fibras (Figura 5).

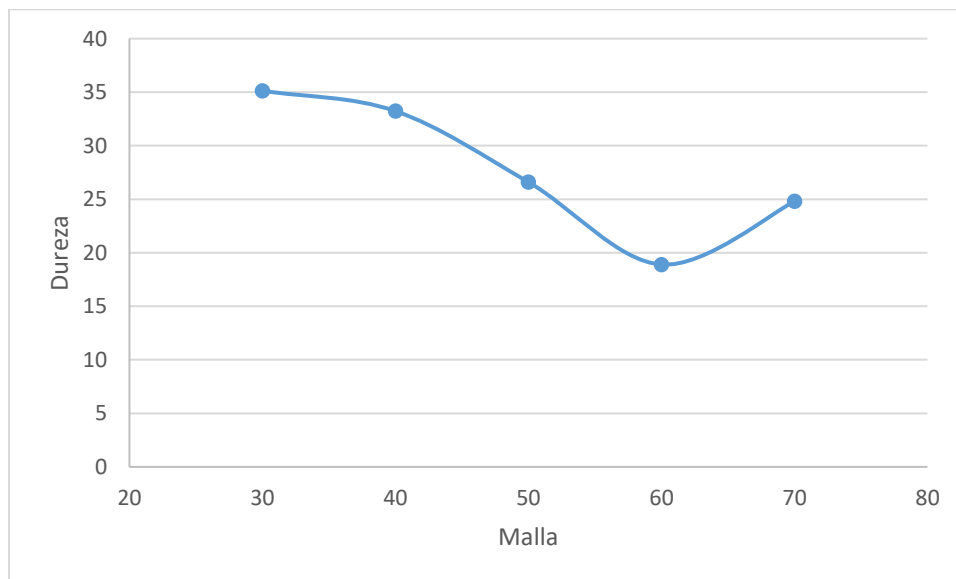


Fig. 5. Relación de dureza y la granulometría de las fibras.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para clasificar la emulsión según su tamaño se realizó la medición del radio y se obtuvo un rango entre 0.2 y 50 μm que coincide con el de las macroemulsiones, que

presentan típicamente una apariencia turbia y viscosa, debido a que la longitud de onda de la luz es inferior al de las gotas. La caracterización de la emulsión según sus fases usando colorantes y analizada bajo el microscopio permite elucidar que el colorante de menor polaridad tiñe la fase continua de la emulsión y el de tipo hidrófilo lo hace principalmente con el interior de las micelas (Figura 1). Esto confirma que se trata de una emulsión tipo W/O donde la fase dispersada es el agua. Formular una emulsión con el 50% de agua permite ahorrar costos relacionados con la obtención del solvente y facilita la incorporación del material en la industria.

Para la prueba de resistencia a la compresión de las probetas se parte de tres hipótesis: 1) Todas las fibras presentan la misma resistencia. 2) Se da un comportamiento elástico-lineal hasta rotura tanto de la fibra como de la matriz. 3) Las fibras y la matriz sufren la misma deformación. En la Figura 6 se observa que en cada una de las curvas se presenta un rango en el cual el esfuerzo es proporcional a la deformación. Después de este rango, se empieza a notar una cierta curvatura que indica el comienzo de una deformación plástica, la cual aumenta más rápidamente al aumentar la carga hasta que finalmente se presenta la ruptura de la probeta.

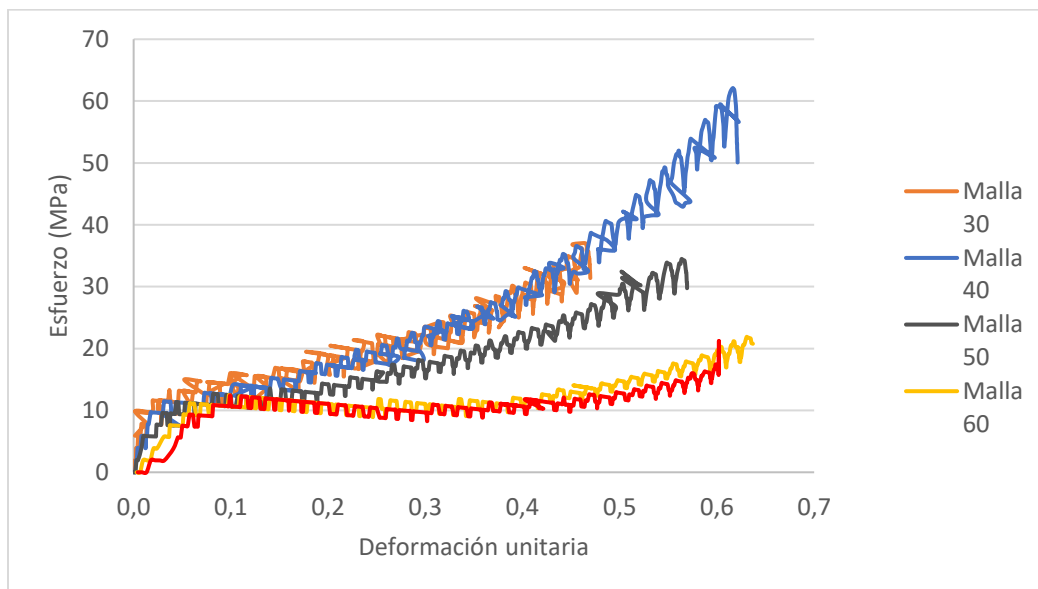


Fig. 6. Resistencia a la compresión real relacionando las distintas granulometrías de fibra medidas.

Las propiedades de los compósitos dependen de la matriz, las fibras y de su unión interfacial. La adhesión entre ambos (Figura 7) juega un papel importante, ya que la transferencia de tensión entre la matriz y las fibras determina la eficiencia del refuerzo [3]. Esta depende de varios factores que incluyen la naturaleza de sus componentes, incluyendo su polaridad. La fibra OPEFB es fuertemente polar debido a los grupos hidroxilo y los enlaces C-O-C en su estructura. Esto la hace más compatible con los polímeros polares. Por otro lado, el grado de interacción interfacial determina la capacidad de transferencia de estrés de un compuesto fibroso. Los grupos hidroxilo pueden estar involucrados en el enlace de hidrógeno dentro de las moléculas de celulosa, reduciendo así la actividad hacia la matriz [28]. Por tanto, para un compósito EPS-OPEFB sin tratamiento químico de sus fibras, sumado a la baja polaridad que presenta el polímero, es predecible encontrar una interacción regular.

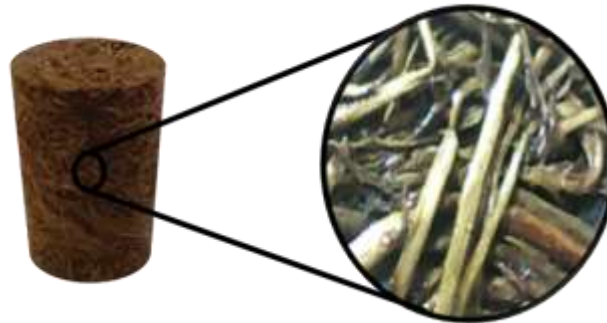


Fig. 7. Vistas de una probeta elaborada con fibras de granulometría No.40 donde se observa su adhesión y entrecruzamiento.

Se pudo establecer que a menor número de malla de las fibras se presenta menor dureza, menor resistencia a la compresión y menor módulo de Young. Las probetas elaboradas con fibras de tamaño de malla No. 40 presentan la máxima resistencia a la compresión con una medida de 6,21 MPa y la mínima en 2,12 MPa para las de malla No.70. Los bajos valores en ambos ensayos demuestran que hay una interacción interfacial baja entre el sistema OPEFB-EPS, por lo que se sugiere

realizar un tratamiento químico previo que modifique la superficie del raquis para mejorar la compatibilidad y la fuerza del enlace interfacial [3]. Diversos estudios [29-33] confirman que la interacción interfacial deficiente conduce a tensiones internas, porosidad, degradación ambiental, absorción de humedad, propiedades mecánicas deficientes de las piezas compuestas y desunión con el tiempo.

Con respecto al tamaño de la fibra, se sabe que al hacer que los diámetros sean tan pequeños como sea posible, las fibras tienen menos área superficial y, en consecuencia, menos defectos que pudieran propagarse durante el proceso o bajo carga [34]. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto, haciendo que cuantos menos existan, mayor será la capacidad de absorción de carga de las fibras. Las configuraciones de fibras largas, o incluso continuas y unidireccionales, producen propiedades anisotrópicas, con una resistencia y rigidez particularmente buenas en dirección paralela a las fibras.

La matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición, transfiere la carga a las fibras fuertes, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso, y evita la propagación de grietas en las fibras hacia todo el compuesto. Las propiedades anisótropas de la fibra en la probeta hacen que la resistencia a la compresión sea baja, así como los débiles enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals que ocasionan una relajación local y deshilachamiento. Como la unión es débil, las fibras en los extremos salieron de la matriz durante la carga, reduciendo la robustez y la resistencia a la fractura de la probeta. De igual forma, incorporar mezclas de material retenido en distintas mallas puede traer mejoras en cuanto a la resistencia mecánica medida a compresión.

El mejoramiento de las propiedades en los materiales compuestos es un problema complejo que sigue siendo fuente de interés y que promueve una intensa labor de investigación para optimizar su desempeño integrando fibras naturales o elaborándolos a partir de ellas. La búsqueda de alternativas para la madera con características similares o superiores es un reto y esta investigación contribuye a avanzar un poco en la dirección de una sociedad que se adapte a las demandas de un mundo enmarcado en una crisis ambiental sin precedentes que obligará eventualmente a reducir al mínimo la deforestación y la producción de plásticos.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Cindy Gutiérrez ejecutó la metodología del proyecto con la dirección permanente de José Carlos Gutiérrez (investigador principal) y Melba Sánchez apoyó la parte inicial del tratamiento de las fibras de raquis y asesoró la elaboración del presente artículo.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue posible gracias a la financiación del Proyecto 2424 de la Universidad Industrial de Santander y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión.

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera Carlina Londoño; al GIMAT y a las Escuelas de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Química de la UIS.

REFERENCIAS

- [1] L. Mohammed, M. N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- [2] M. J. John, and S. Thomas, "Biofibres and biocomposites," *Carbohydrate polymers*, vol. 71 (3), pp. 343-364, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- [3] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, "Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement," *The Composites Part B: Engineering*, vol. 40 (7), pp. 601-606, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>
- [4] M. Shimao, "Biodegradation of plastics," *Current opinion in biotechnology*, vol. 12 (3), pp. 242-247, Jun. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00206-8](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00206-8).
- [5] V. Zitko, "Expanded polystyrene as a source of contaminants," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 26 (10), pp. 584-585, Oct. 1993. [https://doi.org/10.1016/0025-326x\(93\)90412-d](https://doi.org/10.1016/0025-326x(93)90412-d)
- [6] P. S. Schmidt, M. H. Cioffi, H. C. Voorwald, and J. L. Silveira, "Flexural test on recycled polystyrene," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 930-935, Apr. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.153>
- [7] M. E. Tawfik, S. B. Eskander, and G. Nawwar, "Hard wood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 134 (18), May. 2017. <https://doi.org/10.1002/app.44770>
- [8] M. T. García, G. Duque, I. Gracia, A. de Lucas, and J. F. Rodríguez, "Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents," *Journal of material cycles and waste management*, vol. 11 (1), pp. 2-5, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1007/s10163-008-0210-8>

- [9] M. S. Sreekala, M. G. Kumaran, and S. Thomas, "Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 66 (5), pp. 821-835, Oct. 1997. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19971031\)66:5<821::aid-app2>3.3.co;2-l](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19971031)66:5<821::aid-app2>3.3.co;2-l)
- [10] S. Takase, and N. Shiraiishi, "Studies on composites from wood and polypropylenes II," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 37(3), pp. 645-659. Jan. 1989. <https://doi.org/10.1002/app.1989.070370305>
- [11] J. M. Felix, and P. Gatenholm, "The nature of adhesion in composites of modified cellulose fibers and polypropylene," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 42 (3), pp. 609-620, Feb. 1991. <https://doi.org/10.1002/app.1991.070420307>
- [12] Mi. Yongli, X. Chen, and Q. Guo, "Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: Crystallization and interfacial morphology," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 64 (7), pp.1267-1273, Dec. 1998. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-4628\(19970516\)64:7<1267::aid-app4>3.3.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-4628(19970516)64:7<1267::aid-app4>3.3.co;2-b)
- [13] H. D. Rozman, H. Ismail, R. M. Jaffri, A. A. Aminullah, Z. A. Mohd Ishak, "Mechanical properties of polyethylene-oil palm empty fruit bunch composites," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 37 (4), pp. 495–507, Nov.1998. <https://doi.org/10.1080/03602559808001376>
- [14] K. Bledzki, S. Reihmane, and J. Gassan, "Thermoplastics Reinforced with Wood Fillers: A Literature Review," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 37 (4), pp. 451-468, Aug. 1998. <https://doi.org/10.1080/03602559808001373>
- [15] H. D. Rozman, P. P. Lim, A. Abusamah, R. N. Kumar, H. Ismail, and Z. A. Mohd Ishak, "The Physical Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Composites Made from Various Thermoplastics," *International Journal of Polymeric Materials*, vol. 44 (1-2), pp. 179-195, Aug. 1999. <https://doi.org/10.1080/00914039908012144>
- [16] P. V. Joseph, K. Joseph, and S. Thomas, "Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites," *Composites Science and Technology*, vol. 59 (11), pp. 1625-1640, Aug. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00024-X)
- [17] D. Nabi Saheb, and J. P. Jog. "Natural fiber polymer composites: a review," *Advances in Polymer Technology*, vol.18 (4), pp. 351-363, Oct. 1999. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2329\(199924\)18:4<351::aid-adv6>3.3.co;2-o](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2329(199924)18:4<351::aid-adv6>3.3.co;2-o)
- [18] C.A. Hill, and K. Abdul. "Effect of fiber treatments on mechanical properties of coir or oil palm fiber reinforced polyester composites," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 78(9), pp.1685-1697, Nov. 2000. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001128\)78:9<1685::AID-APP150>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001128)78:9<1685::AID-APP150>3.0.CO;2-U)
- [19] H. D. Rozman, G. S. Tay, A. Abubakar, and R. N. Kumar, "Tensile properties of oil palm empty fruit bunch-polyurethane composites," *European Polymer Journal*, vol. 37(9), pp. 1759-1765, Sep. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00063-5)
- [20] F. Mata-Cabrera, "Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles," *Revista Técnica Industrial*, 2004. <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-1550-utilizacion-composites-matriz-polimerica-fabricacion-automoviles.aspx>
- [21] S. N. Kale, and S. L. Deore. "Emulsion Micro Emulsion and Nano Emulsion: A Review," *Systematic Reviews in Pharmacy*, vol. 8 (39), pp. 39-47, Oct. 2017. <https://doi.org/10.5530/srp.2017.1.8>
- [22] O. Torres, *Reciclaje de la espuma de poliestireno mediante el uso de d-limoneno*. Grade Thesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2004.

- [23] T. M. Noguchi, Y. Miyashita, Inagaki, and H. Watanabe, "A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. Part 1. A new recycling technique," *Packaging Technology and Science*, vol.11 (1), pp. 19-27, Feb. 1998. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1522\(199802\)11:1<19::aid-pts414>3.3.co;2-x](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1522(199802)11:1<19::aid-pts414>3.3.co;2-x)
- [24] S. C. H. Mangalara, and S. Varughese. "Green Recycling Approach to Obtain Nano-and Microparticles from Expanded Polystyrene Waste," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 4 (11), pp. 6095-6100, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01493>
- [25] J. W. Kim, D. Lee, H. C. Shum, and D.A. Weitz, "Colloid surfactants for emulsion stabilization," *Advanced materials*, vol. 20 (17), pp. 3239-3243, Sep. 2008. <https://doi.org/10.1002/adma.200800484>
- [26] C. A. López, *Modelo de Estabilidad de Emulsiones Poliméricas*. Doctoral Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2012.
- [27] E. E. Stashenko, Y. Combariza, and M. Puertas, *Aceites Esenciales: Técnicas de extracción y análisis*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998.
- [28] M. S. Sreekala, M. G. Kumaran, S. Joseph, M. Jacob, and S. Thomas, "Oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites: influence of fibre surface modifications on the mechanical performance," *Applied Composite Materials*, vol. 7 (5-6), pp. 295-329, Nov. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026534006291>
- [29] S. Shinoj, R. Visvanathan, S. Panigrahi, and M. Kochubabu, "Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review," *Industrial Crops and products*, vol. 33 (1), pp. 7-22, Jan. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>
- [30] M. Khalid, C. T. Ratnam, T. G. Chuah, S. Ali, and T. S. Choong, "Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose," *Materials & Design*, vol. 29 (1), pp. 173-178, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.002>
- [31] N. W. A Razak, and A. Kalam, "Effect of OPEFB size on the mechanical properties and water absorption behaviour of OPEFB/PPnanoclay/PP hybrid composites," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1593-1599, May. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.355>
- [32] L. Prabhu, V. Krishnaraj, S. Sathish, S. GokulKumar, and N. Karthi, "Study of mechanical and morphological properties of jute-tea leaf fiber reinforced hybrid composites: Effect of glass fiber hybridization," in *International conference on Materials and Manufacturing Methods*, India, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.132>
- [33] N. Saba, M. Jawaid, and M. T. H. Sultan, "Thermal properties of oil palm biomass based composites," *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials*, vol. 2017, pp. 95-122, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00006-8>
- [34] D. R. Askeland, and W. Wright, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson Editores, 1998.