

Recibido:
30/11/2023

Aceptado:
19/12/2023



Caracterización de propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz de polietileno de alta densidad reforzados con fibras naturales para su aplicación en punteras de calzado de seguridad¹

Characterization of mechanical properties of high density polyethylene matrix composites reinforced with natural fibers for application in safety footwear toe caps

Manuel Alberto Guzmán Sánchez²
José Sebastián Vélez Valencia²
Ramiro Ríos Sossa³

Cómo citar:

Guzmán, M., Vélez, J., y Ríos, R. (2023). Caracterización de propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz de polietileno de alta densidad reforzados con fibras naturales para su aplicación en punteras de calzado de seguridad. Revista Del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación, 7(1), 108-119. <https://doi.org/10.23850/23899573.6076>.

¹ Caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales para su aplicación en punteras de calzado de seguridad.

² Ingeniero mecánico, Doctor en Ingeniería de materiales. manguzmans@gmail.com, Itagüí.

³ Investigador, Servicio Nacional de Aprendizaje, Tecnólogo en diseño de productos industriales. riosqf@gmail.com, Itagüí.

⁴ Químico Farmacéutico, Maestría en Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias

RESUMEN

El calzado de seguridad se ha convertido en un aspecto de vital importancia en las industrias manufactureras para proteger los pies de riesgos potenciales tales como caídas de objetos pesados, impactos, cortaduras, penetración y compresión, y otros potenciales riesgos como químicos, térmicos y eléctricos. Los materiales compuestos se utilizan de una forma única para obtener una combinación de propiedades y así alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, densidad, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. En este estudio se usaron materiales compuestos de matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzado con fibras naturales de fique, piña y plátano para su aplicación en punteras de calzado de seguridad. Los resultados demuestran que la fibra de piña proporciona unas propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión, módulo de Young y resistencia a la flexión similares o elevadas, comparadas con el material virgen y con las demás fibras. Adicionalmente, se realizaron ensayos de compresión e impacto a prototipos de punteras reforzadas con las fibras naturales siguiendo las especificaciones de estándares de calidad internacional.

Palabras clave: *punteras, calzado de seguridad, materiales compuestos, propiedades mecánicas.*

Abstract

Safety footwear has become a vitally important aspect in manufacturing industries to protect feet from potential hazards such as falling heavy objects, impacts, cuts, penetration and compression, and other potential hazards such as chemical, thermal and electrical. Composite materials are used in a unique way to obtain a combination of properties to achieve unusual combinations of stiffness, weight, density, high temperature performance, corrosion resistance, hardness or conductivity. In this study, high-density polyethylene (HDPE) matrix composites reinforced with natural fibers of fique, pineapple and banana were used for application in safety footwear toe caps. The results show that the pineapple fiber provides similar or high mechanical properties such as tensile strength, Young's modulus and flexural strength compared to the virgin material and the other fibers. Additionally, compression and impact tests were carried out on prototypes of toe caps reinforced with natural fibers following the specifications of international quality standards.

Keywords: *toe caps, safety footwear, composite materials, mechanical properties.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el calzado de seguridad se ha convertido en un aspecto de vital importancia en las industrias manufactureras para proteger los pies de posibles riesgos potenciales tales como objetos pesados, impacto, cortaduras, penetración y compresión, y otros potenciales riesgos como químicos, térmicos y eléctricos. Las punteras de acero suelen ser las más comunes debido a su bajo costo, sin embargo, son pesadas, susceptibles a la corrosión, tienen bajo aislamiento térmico, son incómodas, magnéticas y alertadas por detectores de metal. Por su parte, las punteras de aluminio son más ligeras que las de acero, más cómodas, no acumulan calor y son resistentes al calor, pero son más costosas que las punteras de acero y al igual que las de acero, son detectadas por el arco de metal.

De manera diferente, las punteras no metálicas se han venido utilizando cada vez más en el calzado de seguridad debido a que son ligeras, flexibles y cómodas, térmicamente no conductoras, no magnéticas, antiestáticas y no son alertadas por detectores de metal, pero dependiendo del tipo de material utilizado, su coste de fabricación puede ser ligeramente superior, la protección contra impactos puede ser menor y son más vulnerables a ácidos (Erden & Ertekin, 2017, Bianchi et al., 2022, Yang, 2010).

Las punteras no metálicas pueden fabricarse con diferentes materiales poliméricos, tales como el polietileno de alta densidad (HDPE), poliamida (PA), poliuretano termoplástico (TPU) o policarbonato (PC) mediante moldeo por inyección, y aquellas reforzadas se fabrican normalmente de matrices termoestables y termoplásticas reforzadas con fibras de carbono, vidrio y kevlar por diferentes procesos de manufactura (Bianchi, 2022, Erden & Ertekin, 2017). Adicionalmente, las fibras vegetales se están convirtiendo en una alternativa llamativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, peso ligero y por ser una materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Velásquez, et al. 2015).

En la literatura se han encontrado diferentes investigaciones en aplicaciones para punteras donde se observan sus comportamientos. En un estudio se diseñó y fabricó una puntera compuesta de fibra de vidrio y poliéster para calzado de seguridad con el fin de aumentar la capacidad de absorción de energía durante el impacto y reducir el peso de la puntera de acero (Seung, Tae, & Dai, 2005). Algunos investigadores diseñaron punteras compuestas

biodegradables a base fibras de lino y una matriz polimérica de PLA, encontrándose que la resistencia mecánica de las piezas compuestas puede variar hasta cuatro veces combinando la dirección de la fibra dentro de los laminados. El producto final logró hasta un 50% de reducción de peso en comparación con productos metálicos tradicionales (Yang, 2010). Veiga (Veiga Rodrigues, 2020) usó policarbonato (PC) para mezclarlo con acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), ABS funcionalizado con anhídrido maleico (ABS-gAM), elastómero de estireno-etileno-butileno-estireno funcionalizado con anhídrido maleico (SEBS-gAM) y un elastómero de copoliéster termoplástico (COPE) reforzados con nanoarcillas y fibras naturales (algodón). Los compuestos de SEBS-gAM y COPE fueron los que más incrementaron la tenacidad teniendo en cuenta que el módulo elástico apenas incrementó debido a las nanoarcillas y fibras naturales como refuerzo. Zukas y sus colaboradores (2015) incorporaron nanorefuerzos (nanotubos de carbono y nanoarcillas modificadas orgánicamente como bentonita y montmorillonita) a un compuesto de metilmetacrilato reforzado con fibra de carbono para mejorar la resistencia al impacto. En otro estudio, fabricaron punteras a partir de resina epoxi reforzada con tejidos de vidrio tipo E, carbón y aramida con diferente número de capas mediante moldeo por compresión (Erden & Ertekin, 2017). En un estudio se evaluó la influencia del tipo de puntera en el microclima en calzado de protección (Irmanska, 2014). Finalmente, Janson y otros autores (Janson, Newman & Dhokia, 2019) mencionan que el requisito de un cambio radical es necesario debido a la falta de comodidad, ajuste y atractivo estético (estilo) que ofrecen los diseños actuales para el calzado de seguridad. Además, tanto el diseño como la fabricación del calzado de seguridad continúan rezagados con respecto a otros tipos de producción de calzado, particularmente, el calzado deportivo.

El objetivo de este trabajo es fabricar materiales compuestos de matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzado con fibras naturales de fique, piña y plátano para su aplicación en punteras de calzado de seguridad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Como matriz de los compuestos se usó polietileno de alta densidad (HDPE) con una densidad de 954 kg/m^3 , resistencia al impacto Izod con muescas a 23°C

de 3 kJ/m², dureza Shore D de 61, tasa de flujo de fusión (MFR) a 190 °C y 2.16 kg de 30 g/min, temperatura de ablandamiento Vicat a 10 N de 125°C. Y como refuerzo se usaron fibras aleatorias naturales de fique, piña y plátano.

2.2. Métodos

Para la caracterización de propiedades mecánicas como la tracción a probetas estandarizadas se usó la norma ASTM D3039, prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica. Los ensayos se realizaron en una máquina universal marca Lloyd Instruments modelo EZ 20 con una celda de carga de 1kN a una tasa de desplazamiento de mordazas de 2 mm/min.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de flexión siguiendo la norma ASTM D7264, estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz polimérica. El procedimiento A se utiliza para cargas de tres puntos. Este método de prueba fue desarrollado para un uso óptimo con compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra continua. Las probetas estandarizadas para este ensayo se realizaron en una máquina universal marca Lloyd Instruments modelo EZ 20 con una celda de carga de 1kN a una tasa de desplazamiento de mordaza de 1 mm/min y una longitud entre soportes (L) de 51 mm hasta la fractura de las probetas.

Para determinar la resistencia al impacto y a la compresión de punteras, se usó la norma ISO 22568-2:2019.

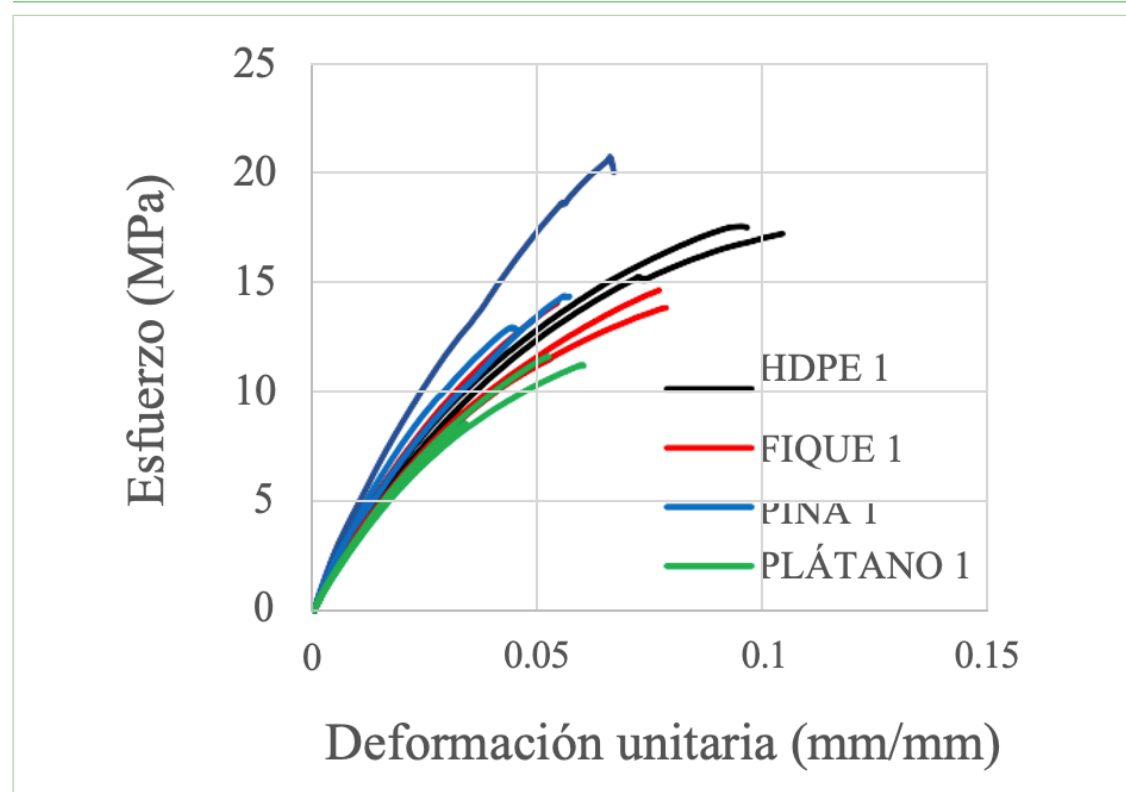
Este trabajo de investigación también incluye el proceso de manufactura más adecuado para hacer efectiva la incorporación de dicha fibra de refuerzo en la matriz, ya que por métodos tradicionales de procesamiento de polímeros como la inyección y la extrusión, involucran esfuerzos de cizallamiento, lo cual contribuye a la procesabilidad más eficiente del polímero ya que su estructura de alto peso molecular se dificulta en procesos de moldeado por colado. Con el fin de mejorar y garantizar la homogeneidad de la fibra natural de refuerzo dentro de la matriz polimérica, se realizaron ensayos llevando al polímero matriz al punto de transición vítrea en un molde por colado para luego incorporar la fibra y así obtener probetas estandarizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayos a probetas estandarizadas

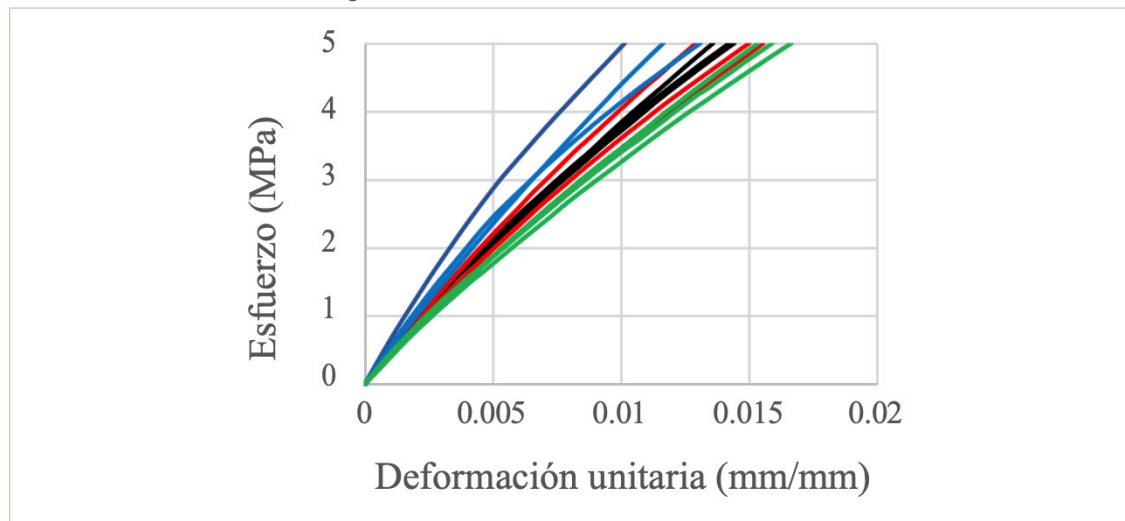
En los ensayos de tracción de las probetas estandarizadas se inicia la prueba observando la distancia entre las marcas de referencia y se registra la fuerza de rotura del material (Figura 1). Las probetas designadas como HDPE representan a la matriz polimérica virgen, mientras que las demás, representan aquellas probetas reforzadas con diferentes fibras en un 15% en peso. Para observar mejor el comportamiento de la zona inicial de las curvas y calcular las propiedades mecánicas de los compuestos, se grafica la deformación unitaria hasta el 2 % como se muestra en la Figura 2.

Figura 1. Curvas esfuerzo-deformación en tensión



Fuente: Servicio Nacional de Aprendizaje

Figura 2. Curvas esfuerzo-deformación en tensión



Fuente: Servicio Nacional de Aprendizaje

De esta manera, se determinaron las propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión, elongación a la rotura y el módulo de elasticidad o módulo de Young (calculado a partir de la pendiente de la tangente al inicio de la curva esfuerzo-deformación). Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las propiedades mecánicas

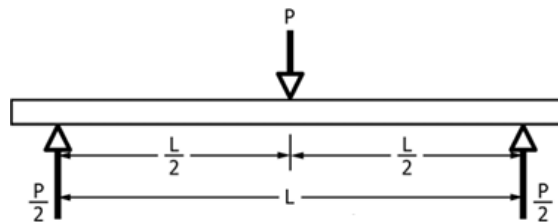
	HDPE	Fique	Piña	Plátano
Resistencia	15.41	13.79	15.99	10.45
a la tensión	±3.40	±0.85	±4.11	±1.67
(MPa)				
Elongación	0.07	0.05	0.05	0.04 ±
a la rotura	±0.02	±0.01	±0.01	0.01
(%)				
Módulo de	434.10	425.62	533.7	388.73 ±
Young	±26.66	±37.51	±61.4	18.49
(MPa)				

Debido al comportamiento anisotrópico de estos materiales, la ruptura dependerá no solo de las propiedades de la matriz y del refuerzo, sino también de la interfase y la interacción entre ellos. De tal manera que se toma el módulo de Young como propiedad a evaluar entre los compuestos, ya que la resistencia a la tensión se define como el esfuerzo en el cual se da la ruptura de la probeta. Se puede observar que los compuestos con matriz de HDPE reforzados con fibra de piña fueron los que mayores módulos de Young presentaron. La fibra de

fique no presenta diferencias estadísticamente significativas comparadas con el HDPE virgen, y la fibra de plátano fue la que no tuvo una interacción mejorada con la matriz.

Los ensayos de flexión se realizaron para determinar las propiedades mecánicas bajo cargas de flexión usando el procedimiento A (ensayo de flexión de tres puntos), especificado en la Figura 3:

Figura 3. Diagrama del ensayo de flexión de tres puntos



Fuente: ASTM D7264

Aquí, P es la carga y L es la longitud entre soportes. El estado de esfuerzo de este tipo de ensayos combina esfuerzos de compresión en la zona superior de la probeta, mientras que la zona inferior está sometida a esfuerzos de tensión. De esta manera, y debido a la geometría de la probeta estandarizada (sección transversal rectangular), la resistencia a la flexión de un material se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_{flexión} = \frac{3PL}{2hw^2}$$

Donde w es el ancho y h la altura de la probeta. Los resultados de la resistencia a la flexión se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resistencia a la flexión (MPa)

HDPE	Fique	Piña	Plátano
13.46 ±2.08	13.11 ±3.26	11.85 ±1.52	8.58 ±3.64

De acuerdo con los resultados obtenidos, no se evidencian diferencias significativas entre los compuestos de fique y piña, y se encuentra una reducción en la resistencia a la flexión de los compuestos reforzados con fibra de plátano

comparados con los de material virgen. Esto se puede deber a la baja resistencia a la tensión de la interfase observada en los ensayos de tracción, especialmente en los compuestos reforzados con fibra de plátano.

En los materiales compuestos, son importantes las propiedades y fracciones volumétricas de cada fase individual; en este caso, el contenido de fibra era siempre del 10% en peso. Pero también es importante la conectividad de los materiales o fases; la fase matriz es la fase continua y la otra, es la fase dispersa (fibra). La conectividad o interfase se refiere a la forma en que dos o más fases están interconectadas en el compuesto. Para este estudio, no se usaron agentes de acoplamiento ni métodos químicos o mecánicos para funcionalizar el HDPE, ya que acarrearía procesos y costos adicionales.

Finalmente, las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas y, a menudo, sus dimensiones se caracterizan en función de la relación longitud/diámetro; la resistencia del compuesto se mejora cuando esta proporción dimensional (l/d) es grande. A veces las fibras se fracturan debido a defectos superficiales. Al hacer que los diámetros sean tan pequeños como sea posible, las fibras tienen menos área superficial, por lo tanto, menos defectos que se pueden propagar bajo una carga. También son preferibles las fibras largas, ya que los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; en consecuencia, mientras menos extremos existan, mayor será la capacidad de absorción de carga de las fibras (Askeland, 2017). En este caso de estudio, la relación l/d aproximada de las fibras es: 511 para la fibra de fique, 13636 para la piña y 188 para el plátano.

3.2 Ensayos a punteras

Los ensayos para determinar la resistencia al impacto se realizaron siguiendo la norma ISO 22568-2:2019 numeral 5.3 en donde se deja caer un percutor sobre el eje de ensayo de la puntera desde una altura adecuada para proporcionar una energía de impacto de 200 J para punteras destinadas a usarse en calzado de seguridad, o de 100 J para punteras destinadas a usarse en calzado de protección.

Los ensayos para determinar la resistencia a la compresión se realizaron siguiendo la norma ISO 22568-2:2019 numeral 5.4 en donde las punteras son sometidas a una carga de compresión de 15 kN para punteras destinadas a usarse en calzado de seguridad o de 10 kN para punteras destinadas a usarse

en calzado de protección, y se evalúa la luz vertical libre de la puntera luego de la compresión y la apariencia final.

Los ensayos de compresión e impacto determinaron que los materiales vírgenes de HDPE no cumplen con las especificaciones de calzado de seguridad ni de protección.

Por esta razón se realizaron mezclas de HDPE y PP en diferentes proporciones (HDPE50 – PP50, HDPE30 – PP70 y HDPE70 – PP30) con el objetivo de combinar las propiedades mecánicas de ambas poliolefinas. Ambos polímeros presentan diferentes propiedades a diferentes temperaturas de acuerdo con los estudios de Calvimontes y Palacios (Calvimontes y Palacios, 2000).

4. Conclusiones

En este proyecto de investigación se caracterizaron mecánicamente las propiedades de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales para su aplicación en punteras de calzado de seguridad o protección. Entre las matrices analizadas, se evidenció mejores propiedades mecánicas de impacto y compresión para el HDPE, sin embargo, la adición de 10% en peso de PP podría mejorar las propiedades mecánicas. Por otro lado, entre las fibras usadas para reforzar la matriz, se evidenció mejores propiedades en tensión y compresión para fibras de piña, las cuales tienen una relación longitud/diámetro mucho mayor que fibras de fique o plátano.

Por otro lado, los procesos de manufactura convencionales como inyección y extrusión para este tipo de materiales compuestos no son adecuados. El proceso de inyección no permite la incorporación de las fibras de manera homogénea y el proceso de extrusión involucraría la peletización y corte de las fibras de refuerzo obteniendo una relación longitud/diámetro menor, lo cual contribuiría con la disminución de las propiedades mecánicas del compuesto. De esta manera, el moldeo por colado, incorporación de la fibra cuando la matriz está en estado fundido y el moldeo por compresión, aseguran una incorporación homogénea de la fibra en la matriz polimérica.

5. REFERENCIAS

- Askeland, D., Wright, W., Ciencia e Ingeniería de los materiales, 7ed, Cengage Learning, 2017.
- Bianchi, I., Forcellese, A., Simoncini, M., Castorani, V., Arganese, M., & De Luca, C. (2022). Life cycle impact assessment of safety shoes toe caps realized with reclaimed composite materials. *Journal of Cleaner Production*, 347.

- Calvimontes, A. y Palacios, J. (2000) Diagrama de fases de pseudo mezclas binarias de poli(etileno)-poli(propileno). *Revista de la Sociedad Química de México*, Vol. 44, Núm. 4, 270-274
- Erden, S., & Ertekin, M. (2017). Mechanical evaluation of a composite overshoe protector. *Textile and Apparel*, 414-420.
- Irzmanska, E. (2014). Case study of the impact of toecap type on the microclimate in protective footwear. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 706-714.
- Janson, D., Newman, S. & Dhokia, V. (2019). Next Generation Safety Footwear. 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019), June 24-28, 2019, Limerick, Irlanda.
- Seung, M. L., Tae, S. L., & Dai, G. L. (2005). Damage tolerance of composite toecap. *Composite Structures*, 167-174.
- Veiga Rodrigues, P. (2020). Development of polymeric systems for safety footwear. Universidade do Minho. Portugal.
- Zukas, T., Jankauskaite, V., Zukiene, K., Malcius, M. (2015). Low-velocity Impact Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Methyl Methacrylate Nanocomposites. *Materials Science*, 21 (2).