

Materiales compuestos de fibras naturales y polímero reciclados: mezclas, pretratamientos, agentes de acople y propiedades mecánicas. - Una revisión

Natural fiber and recycled polymer composite materials: blends, pretreatments, coupling agents and mechanical properties - A review

Mayerly Ortega Díaz¹, Deyner Sahamir Ríos Rojas², Zully Esmeralda Gómez Rosales³, Johanna Karina Solano Meza⁴, David Orjuela Yepes⁵

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2084-158X>. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, mayerlyortega@usantotomas.edu.co

² <https://orcid.org/0000-0002-8476-247X>. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, deynerrios@usantotomas.edu.co

³ <https://orcid.org/0000-0003-4011-4603>. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, zullygomez@usantotomas.edu.co

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-4376-5938>. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, johannasolano@usantotomas.edu.co

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-7944-9710>. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, davidorjuelay@usantotomas.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7579>

Cómo citar

Ortega Díaz, M., Ríos Rojas, D. S., Gómez Rosales, E., Solano Meza, J. K., & Orjuela Yepes, D. (2022). Materiales compuestos de fibras naturales y polímero reciclados: mezclas, pretratamientos, agentes de acople y propiedades mecánicas. - Una revisión. *Avances Investigación En Ingeniería*, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7579>

Resumen

Esta revisión bibliográfica sobre los materiales compuestos fabricados a partir de polímeros reciclados y fibras naturales identifica algunas de las mezclas existentes y la influencia de variables como carga de fibra, pretratamiento, uso de agentes de acople y tamaño de fibra en las propiedades mecánicas resultantes de los compuestos. Así, la proporción de fibra más adecuada para que las propiedades mecánicas mejoren varía del 15 % al 40 % en peso; además, pretratamientos como NaOH y agentes de acople derivados del anhídrido maleico mejoran la unión interfacial entre la matriz y la fibra, que resulta en mejores propiedades mecánicas. Así mismo, propiedades como la resistencia a la tracción, módulo de tracción, resistencia a la flexión, módulo de flexión y resiliencia al impacto mejoraron con la adición de fibra hasta un 40 % en peso; mientras que la resistencia al impacto, tensión por deformación a la rotura y elongación siguieron la tendencia de no mejorar ante la adición de fibras. Entonces, tras comparar las propiedades mecánicas de diferentes mezclas de materiales compuestos, variables como pretratamiento, uso de agentes de acople, tamaño de fibra y proporciones de matriz-refuerzo influyen en los materiales compuestos resultantes; y tan solo con variar ligeramente una de ellas, la interacción interfacial puede cambiar radicalmente.

Palabras clave: agente de acople, fibras naturales, materiales compuestos, polímeros reciclados, pretratamiento.

Abstract

This study provides a literature review of composite materials made from recycled polymers and natural fibers. The aim is to identify existing mixtures, as well as the influence of variables such as fiber loading,

pretreatment, the use of coupling agents, and fiber size on the resulting mechanical properties of the composites. The most suitable fiber proportion for improved mechanical properties identified varies from 15 % to 40 % by weight. Furthermore, pretreatments such as NaOH and coupling agents made from maleic anhydride improve interfacial bonding between matrices and fibers, which results in improved mechanical properties. Likewise, it was found that properties such as tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus and impact resilience improved with the addition of fiber up to 40 % by weight. Meanwhile, impact strength, tensile strain and elongation adhered to the trend of not improving with the addition of natural fibers. Therefore, after comparing the mechanical properties of different composite material mixtures, it was found that variables such as pretreatment, the use of coupling agents, fiber size and matrix-reinforcement ratios greatly influence the produced composite materials. Moreover, it was demonstrated that even slightly changing one of the variables can radically alter the interfacial interaction.

Keywords: coupling agents, natural fibers, composite materials, recycled polymers, pre-treatment.

Introducción

En la actualidad, el creciente desarrollo de la sociedad implica directamente mayor oferta y demanda de diversos tipos de productos y servicios [1]. Dado lo anterior, el deterioro de los recursos naturales para satisfacer dichas necesidades es y ha sido un escenario observado cada vez con más frecuencia [2]. A raíz de esto, diversas investigaciones buscan encontrar alternativas viables a la producción de materiales que no involucren recursos no renovables y donde su fabricación alivie preocupaciones como la escasez de agua y la degradación del suelo y medio ambiente en general [3]. Así es como surge la idea de los materiales compuestos, los cuales son resultado de la combinación de dos o más materiales con características diferentes, las cuales al unirse se expresan de mejor forma que individualmente y mejoran así propiedades térmicas y mecánicas de los materiales iniciales [4], [5]. Estos materiales se componen por una matriz y un refuerzo: la matriz es un medio continuo que actúa como aglutinante, que brinda al compuesto ductilidad y tenacidad, que transmite el estrés a las fibras y que actúa como barrera ante los daños ambientales [6], [7]. Por su parte, los refuerzos se presentan en forma de fragmentos, partículas, fibras, etc., y determinan la estructura interna del compuesto [5], [8].

La elección de la matriz es uno de los factores más importantes, debido a que las hay termoestables y termoplásticas, aun cuando los más usados son los termoplásticos como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) [9]. Lo anterior, dado que este tipo de polímeros tienen una vida útil más larga dada su reciclabilidad, mejor resistencia química, baja densidad, buen aislamiento térmico, facilidad de procesamiento, resistencia a la humedad, muy bajo costo, etc. [2], [10], [11]. Además, su temperatura de procesamiento no supera los 220 °C, que es el límite máximo de degradación de las fibras naturales (posibles refuerzos), [9], [12], [13].

Con lo anterior, y según el consumo desmedido de plásticos de un solo uso de la sociedad, por su gran facilidad de adquisición y disponibilidad en el mercado [1], [14], [15], incorporar termoplásticos reciclados para la fabricación de materiales compuestos es una alternativa viable para reducir la eliminación de desechos ya sea en vertederos, mediante incineración o en lugares no aptos, con lo que liberan gases nocivos y toxinas que afectan la fertilidad del suelo y contaminan los sistemas de agua y otros medios [14], [16], [17].

Asimismo, el reciclaje de residuos poliméricos como el PP, el polietileno tereftalato (PET) y el polietileno de alta y baja densidad (HDPE, LDPE) reduce los impactos ambientales asociados con la producción de polímeros derivados de la industria petroquímica [3], [18].

En cuanto a la elección del refuerzo, las fibras naturales de origen vegetal han sido una alternativa ecológica a fibras inorgánicas como el vidrio y el carbón, dada su naturaleza biodegradable y la cantidad de energía requerida para su fabricación [19]. Estas son resultado de procesos agroindustriales, compuestas en general de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. Entre estas, la celulosa es el componente más abundante, ya que su porcentaje varía de planta a planta [20]-[22], las cuales en su mayoría son tratadas como residuos y cuyas cantidades anuales son exorbitantes y generan gran preocupación medioambiental [23]-[25]. Además, dada la tendencia a incinerar dichas fibras, problemas como la contaminación local y la emisión de gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global e impactos sobre la salud humana, se alivian de gran manera con su reutilización y posterior valoración [10], [26].

Una de las principales razones por las cuales se utilizan fibras vegetales como refuerzo en la fabricación de materiales compuestos es la creciente preocupación por el agotamiento de los recursos naturales no renovables [27]. Asimismo, dicho material vegetal posee propiedades muy llamativas, como su alta disponibilidad, baja densidad, bajo peso específico, flexibilidad durante el procesamiento, alta resistencia, rigidez y biodegradabilidad [6], [28]-[30]. Y en comparación con materiales de refuerzo tradicionales, como la fibra de vidrio, la vegetal trae consigo la reducción de costos y el almacenamiento de carbono biogénico, que genera productos verdes y sostenibles [31], [32].

Durante la fabricación de materiales compuestos existe una limitante: el factor adhesión matriz-refuerzo. Este es de vital importancia para el éxito del compuesto y normalmente las fibras naturales tienen poca compatibilidad con matrices poliméricas, debido a la naturaleza hidrofóbica de la matriz e hidrofílica de fibra [13], [33]. Lo anterior da

lugar a la formación de enlaces de hidrógeno entre fibras; pero ello acarrea su aglomeración y conduce a la dispersión desigual en la matriz polimérica y a mala adherencia entre matriz y refuerzo y como resultado quedan compuestos débiles [20]. Por ello, es esencial utilizar diversos tratamientos tanto para la fibra como para la matriz, con el fin de aumentar su compatibilidad y mejorar el rendimiento de la resistencia mecánica de los compuestos [22], [34], [35].

Asimismo, la adición de agentes de acople y compatibilizantes es fundamental para mejorar la adherencia interfacial matriz-refuerzo, con la finalidad de mejorar el rendimiento del compuesto [36], [37]. Esto, ya que el agente de acople actúa como un puente para que exista mayor interacción entre el polímero y el componente lignocelulósico [20], [36]. De esta forma, dichos compuestos podrán usarse en diversos sectores, como el automotor, el aeroespacial, el eléctrico, la construcción, el militar, el embalaje, el naval, el de electrodomésticos, etc. [9], [15], [28], [38].

Inicialmente, esta revisión proporciona un resumen de los pretratamientos, de los tratamientos, del tamaño de partícula, de los métodos, de las técnicas de fabricación; así como una comparación de las propiedades mecánicas de los diferentes compuestos de fibras naturales y plásticos recuperados.

I. Metodología

En primera instancia se llevó a cabo una revisión bibliográfica, según las siguientes fases: primero se delimitaron y organizaron los artículos que se deseaban seleccionar. Aquí la elección del operador lógico más adecuado fue de vital importancia a la hora de generar ecuaciones de búsqueda como: "composite materials" AND "natural fibers", "composite materials" AND "recycled polymers", "natural fiber" AND "recycled polymers", entre otras. Después se eligieron las bases de datos:

Science Direct, SpringerLink, Sage Journals y Scopus (figura 1), a partir de las cuales se depuró la búsqueda según los criterios establecidos, esto es, aquellos artículos que trabajaran con polímeros reciclados y que proporcionaran mayor información acerca de los procesos efectuados para la fabricación de materiales compuestos y sus propiedades mecánicas (figura 2).

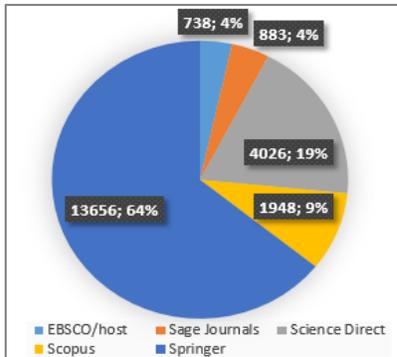


Figura. 1. Disponibilidad de artículos

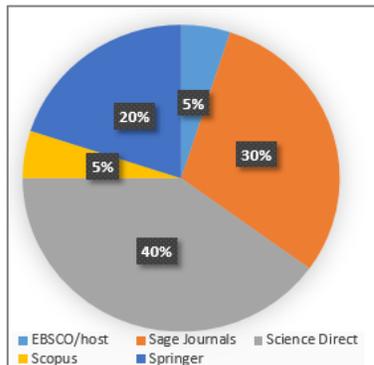


Figura. 2. Resultados de la revisión bibliográfica

Posteriormente, se revisó la información obtenida en cada documento, con la finalidad de obtener los datos de interés mencionados, para luego encontrar posibles similitudes y diferencias entre las diversas composiciones (mediante tablas), seccionadas de acuerdo con las diferentes etapas del proceso de fabricación de los materiales compuestos y así establecer qué mezclas demuestran mejor comportamiento respecto a las propiedades mecánicas. Por último, se analizó la correlación estadística entre el tamaño de la fibra y las propiedades

mecánicas y con esto observar posibles comportamientos y tendencias.

Para complementar la revisión bibliográfica, se buscaron patentes de compuestos de fibras naturales y polímeros reciclados en la base de datos de referencias bibliográficas Scopus (figuras 3 y 4).

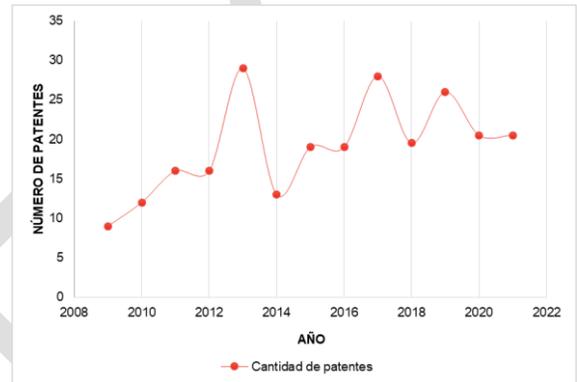


Figura. 3. Patentes reportadas en Scopus

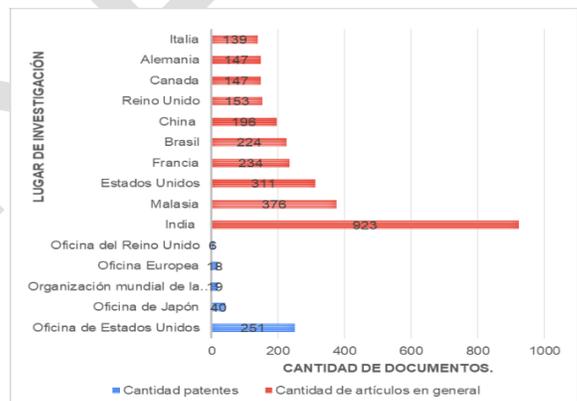


Figura. 4. Patentes reportadas por país en Scopus

En la figura 3 se observa la cantidad de patentes registradas desde el 2009, lo cual evidencia que el tema en específico de fibras naturales con polímeros reciclados no es ampliamente explorado. Por otra parte, en cuanto a la figura 4, denota la cantidad de documentos en general y patentes encontradas por país u oficina de patentes y marcas, y en Latinoamérica, el único referente en cuanto a este tema de investigación es Brasil, con 224 documentos, que hablan acerca del tema pero ninguna patente.

2. Resultados y discusión

Como resultado de la revisión bibliográfica se halló que el tema del reforzamiento de polímeros reciclados con fibras naturales se viene estudiando desde el 2003 y que ha experimentado un crecimiento en el ámbito de la investigación a partir del 2013; además, se identificó que países como Estados Unidos, Malasia, India y Brasil son los que más investigaciones y publicaciones tienen. También se pudo identificar la tendencia a trabajar con ciertas fibras, como el aserrín de madera, hojas de palmera datilera, sisal, bagazo de caña y kenaf. Asimismo, se identificó que dentro de las matrices más usadas están el PP, el PE y el PET,

estudiadas tanto de manera individual como en mezclas con diversas proporciones.

Así pues, el reforzamiento de polímeros con fibras naturales es un campo de investigación que ha tomado gran interés, pero tal como se ha mencionado, es necesario llevar a cabo algunos tratamientos para obtener un aumento considerable de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Dichos tratamientos consisten en una sucesión de procesos que inician con el pretratamiento con detergentes o con agua destilada para posteriormente someter la fibra a un proceso de secado en horno o al medio durante varias horas, para luego realizar el tratamiento químico y finalmente, en algunas ocasiones, realizar un segundo lavado (tabla 1).

Tabla I. Características y tratamiento de las fibras

<i>Tamaño de fibra (mm)</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Referencia</i>
3	-TP, L con detergente a (60 °C)/2 h -T NaOH 1%/1 h; L con H ₂ OD y ácido acético; S a (T° amb)/24 h; S en horno de vacío (80 °C)/12 h -T Silano 5%/1 h	[39]
168	-TP, S en horno al vacío a (105 °C)/24 h -T NaOH 0,05-1 M; L con H ₂ OD; S en horno de vacío a (105 °C) -T Anhídrido acético a (60-70 °C); L con H ₂ OD; S en horno de vacío a (105 °C)	[40]
20	- S en horno a (80 °C)/4 h	[41]
0,15	NE	[42]
0,85	-PT, S a (95 °C)/24 h	[43]
25	-T NaOH 5 % a (50 °C)/24 h; L con H ₂ OD; S en horno a (80 °C)/10 h	[44]
25	-T NaOH 5 % (50 °C)/24 h; L con H ₂ OD; S en horno a (80 °C)/10 h	[44]
0,075	-PT, L -T NaOH 5 % a (100 °C)/1 h; L con H ₂ OD; S en horno de vacío a (60 °C)/24 h	[45]
0,12	NE	[46]
3,5	-T tolueno, etanol y acetona/3 h; S en horno a (105 °C)/16 h	[47]
4,25	-PT, S a (T° amb) -T NaOH 5%/24 h; L con H ₂ OD a (T° amb)/3 días	[48]
140	-PT, L con detergente a (60 °C)/2 h; L con H ₂ OD a (T° amb)/2 h -T NaOH 1N/1 h; L con H ₂ O y ácido acético; S a (T° amb)/24 h; S en horno de vacío a (80 °C)/12 h	[49]
140	-PT, L con detergente a (60 °C)/2 h; L con H ₂ OD a (T° amb)/2 h -T NaOH 1N/1 h; L con H ₂ O y ac. Acético; S a (T° amb)/24 h; S en horno de vacío a (80 °C)/12 h	[49]
140	-PT, L detergente (60 °C)/2 h; L H ₂ OD a (T° amb)/2 h	[49]

	-T NaOH 1N/1 h; L con H ₂ O y ac. Acético; S a (T° amb)/24; S en horno de vacío a (80 °C)/12 h	
75	-PT, L con detergente/30min; S a (T° amb): S en horno de vacío -T NaOH/18 h; L con H ₂ O y ac. Acético; S a (T° amb)/24 h; S en horno de vacío a (80 °C)/12 h	[50]
75	-PT, L con detergente/30min; S (T° amb): S en horno de vacío -T NaOH/18 h; L H ₂ O y ácido acético; S a (T° amb)/24 h; S en horno de vacío a (80 °C)/12 h	
27,5	-T L H ₂ OD /48 h; S en horno/2 h	[51]
0,250	-T S en horno a (60 °C)/ 24 h	[52]
0,04	NE	[53]
0,1	-PT, L -T NaOH 1 % a (80 °C)/1 h.; L H ₂ OD; S en horno a (60 °C)/1 día	[54]
0,4275	-T, S en horno a (102 °C)/ 24 h	[55]
	-T NaOH 10 % a (T° amb)/3 h; L H ₂ OD; S en horno a (80 °C)/ 5 h	
2,5	-T NaOH 10 % a (T° amb)/3 h; L H ₂ OD; S en horno a (80 °C)/ 5 h	[56]
5 mm	-T NaOH 10 % a (T° amb)/3 h; L H ₂ OD; S en horno a (80 °C)/ 5 h	
0,5	- T L con H ₂ OD/24 h; S en horno a (80 °C)/24 h	[57]
0,1	-PT, S en horno -T tolueno etanol y acetona/3 h; S en horno a (105 °C)	
0,212	-PT, S en horno -T tolueno etanol y acetona/3 h; S en horno a (105 °C)	[58]
0,3	-PT, S en horno. -T tolueno etanol y acetona/3 h; S en horno a (105 °C)	
0,45	NE	[59]
0,18	-T, S en horno a (110 °C)/8 h	[60]
3	-T, L H ₂ O; S a (T° amb)	
3	-T, L H ₂ O; S a (T° amb)	[61]

TP: tratamiento previo; T: tratamiento; L: lavado; S: secado; H₂OD: agua destilada; T° amb: temperatura ambiente.

Los tratamientos químicos, tal como se puede observar en la tabla 1, se realizan con NaOH, silano, tolueno, acetona, o-hidroxibenceno, diazonio, entre otros, con la finalidad de modificar la superficie de las fibras para que sea más eficiente la adhesión interfacial entre fibra y matriz. Ello evita fragmentaciones de partículas en la matriz y forma un contacto íntimo con esta para obtener una buena unión [54], [62], [63].

Finalmente, se identificó que el tratamiento con NaOH entre 1 % y 10 % es de los más utilizados y efectivos, dado que elimina pectina, lignina, hemicelulosa y otras impurezas superficiales [20], [63]; además, se encontró que el porcentaje de impurezas extraídas dependía significativamente de la concentración alcalina: cuanto mayor es la concentración alcalina, mayor es el porcentaje de pérdida de impurezas [40].

Igualmente, dicho tratamiento contribuye a aumentar los grupos hidroxilo y la cantidad de celulosa expuesta en la superficie de la fibra, lo que mejora la compatibilidad entre la matriz y el refuerzo, debido al aumento de posibles sitios de reacción [44], [45], [64].

En cuanto al tamaño de la fibra, se puede evidenciar que esta puede variar de gran manera, según la finalidad de los compuestos y el tipo de refuerzo que se use para su fabricación. En pruebas experimentales se halló desde 0,075 mm hasta 1,68 mm, según la revisión bibliográfica realizada.

Tabla 2. Condiciones de fabricación de materiales compuesto

<i>Método fabricación</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Agente de acople</i>	<i>Referencia</i>
Mezcla por fusión en mezclador por lotes	180 °C y 40 rpm por 10 min	-MAPP (3 %, 5 % y 7 % en peso)	
Enfriamiento	T° amb; 80 °C por 2 h	-Silano -NaOH	
Moldeo por compresión	P.p 80 kg/cm ² a 190 °C por 15 min	-Metacrilato de glicidilo (GMA) -Cloruro de o-hidroxibenceno diazonio (OBDC): La SLN se mezcló con agua (10:90)	[39]
Mezcla por fusión directa en extrusora de doble tornillo corrotatoria	175 a 190 °C y 300 rpm	MAPP (10 % en peso)	[40]
Extrusión en máquina de doble tornillo	160 a 210 °C	MA (1 % de peso)	[41]
Moldeo por inyección	No especifica		
Extrusión de polímeros en máquina de doble tornillo	30 rpm con 190, 240, 270 y 250 °C		
Moldeo por compresión en prensa caliente	200 °C por 5 min y 1000 PSI	-MAPE (3 %) -E-GMA (5 %)	[42]
Segunda extrusión de fibra con polímeros resultado	170, 215, 210 y 195 °C a 30 rpm		
Fusión de compuestos con mezclador de rotor	5 min		
Fusión en mezclador de fibra y mezcla	165 °C y 60 rpm, por 10 min	-MAPE (0.6 % - 4.5 %) -CAPE (0.9 % -2.1 %) -TDM (0.15 % - 0.9 %)	[43]
Moldeo por compresión en prensa caliente	180 °C por 5-10 min		
Enfriamiento en prensa	T° amb y P de 30 ton		
Extrusión de matriz			
Moldeo por compresión con prensa hidráulica	180 °C por 15 min, P de 1,5 Mpa	No usa	[44]
Premezcla	10 min		
Extrusión en máquina de doble tornillo	225 °C a 245 °C y 55 rpm	Poli (estireno-etileno/butil-dieno-estireno) injertado con anhídrido maleico	[45]
Moldeo por inyección	190 °C a 240 °C, TM° 25 °C		
Fundición con máquina mezcladora interna de doble rotor	180 °C por 15 min y 50 rpm		
Moldeo por compresión con molde de acero inoxidable	180 °C, 15 min de PC; Compactadas por 15 min a P de 20 toneladas	No usa	[46]
Solución y reacción radical	No especifica	Anhídrido maleico (MAH) (agrego 5 % de hidroquinona) (10 %)	[47]
Prensado en caliente	No especifica		
Extrusión en máquina de doble tornillo	166 °C, P de 39 bar y 25 rpm	MAPP (5 % en peso)	[48]
Moldeo por inyección	185° C, P de 66,9 bar		
Mezcla por fusión en mezclador por lotes	180 °C y 40 rpm por 10 min	MAPP (5 %)	[49]
Moldeo por compresión	190 °C y P de 80 bares por 15 min.		
Mezcla por fusión	190 °C por 14 min	MAPP (5 %)	[50]
Moldeo por microinyección	No especifica		
Moldeo en prensa	130 °C a 40 ton por 30min	No usa	[51]
Extrusión en máquina de un solo tornillo	160, 170, 180, 185 y 190 °C y 40 rpm		
Trituración en molino de cuchillas y secado al horno	70 °C por 12 h		
Extrusión en máquina de doble tornillo	115, 150, 180, 185, 185, 190, 190, 195, 200, 200 y 220 °C, respectivamente, y 200 rpm	No usa	[52]
Moldeo por inyección	150, 165 y 180 °C y 100 rpm, TM° 20 °C		

Extrusión en máquina de un solo tornillo	165 °C, 170 °C, 175 °C, 180 °C, 185 °C y 190 °C y 40 rpm	MAPP	[53]
Moldeo por inyección	180 °C, 185 °C, 190 °C, 195 °C y 200 °C, 60 rpm		
Mezcla por fusión en extrusora de doble tornillo	200 °C	MAPE (1 % en peso)	[54]
Mezcla en extrusora de doble tornillo	170, 180 y 190 °C, a 150-165 rpm y P 33-47 bares	MAPP (3 % y 5 %)	[55]
Moldeo por compresión con plancha	280 °C por 4 min a 1 Mpa		
Prensado en frío	5 min a 5 Mpa		
Mezcla en agitador mecánico en proporción	Por 15 min		
Mezcla a moldes de aluminio, 3 mm de espesor	No especifica	MA	[56]
Curación	T° amb por 24 h y a 60 °C por 6 h		
Mezcla por fusión en molino de dos rodillos de 110 mm	160 °C y 30 rpm por 12 min	MAPE (1,5 %, 3 %, 4,5 %)	[57]
Moldeo por compresión	175 °C y P 50 bar por 10 min)		
Extrusora en máquina de un tornillo	PC 180 °C	No usa	[58]
Moldeo por compresión	20 min a 190 °C y 8 ton		
Mezcla en extrusora de doble tornillo	No especifica	MAPP	[59]
Moldeo por inyección	62 Ton y TM° 60 °C		
Extrusión en máquina de doble tornillo	130 - 170 °C y 70 rpm	MAPP (3 %, 4 % Y 5 %)	[60]
Segunda mezcla en seco en extrusora de doble tornillo	130 - 190 °C, 50 rpm y P de 0,10 Mpa y 0,20 Mpa		
Mezcla manual y posteriormente en extrusor de doble tornillo	135 °C, 140 °C, 145 °C, 155 °C y 150 °C y 165 rpm	NO USA	[61]
Moldeo por inyección	140 °C y 150 °C		

P.p: presión de prensa; MAPP: polipropileno injertado con anhídrido maleico; MA: anhídrido maleico; MAPE: polietileno injertado con anhídrido maleico/polietileno maleado; E-GMA: glicidil-etileno metacrilato; T° amb: temperatura ambiente; P: presión; CAPE: polietileno carboxilado; TDM: mezcla titanio; TM°: temperatura de molde; PC: precalentamiento.

Para fabricar materiales compuestos existen múltiples métodos que pueden usarse en conjunto con otros para mejorar sus resultados o pueden usarse individualmente según la aplicación para la cual serán destinados. Dentro de los métodos más empleados se encuentra la fusión, la extrusión, el moldeo por compresión e inyección, entre otros (tabla 2). Dentro de las condiciones de fabricación, la temperatura desempeña un papel muy importante, dado que la mayoría de los métodos implican temperaturas menores a la temperatura de degradación de las fibras (220 °C), con el fin de aprovechar al máximo las propiedades mecánicas que tienen dichos refuerzos. Asimismo, se encuentran algunos rangos de temperatura que sobrepasan el rango de degradación; pero tal como se indica en la tabla 2, dichas temperaturas solo son aplicables directamente al polímero para

luego poder realizar correctamente la mezcla matriz-refuerzo.

Por otra parte, dentro del proceso de fabricación, la adición de agentes de acople es vital, dado que, como se ha mencionado, la naturaleza hidrofílica de las fibras no permite una adhesión interfacial efectiva entre la matriz y el refuerzo, por lo cual alternativas como el anhídrido maleico (MA), el metacrilato de glicidilo polietileno y el polipropileno injertado con anhídrido maleico (MAPE, MAPP) son los más usados para eliminar la absorción de humedad y actuar como dispersante entre las fibras polares y la matriz no polar. Ello mejora la transferencia de estrés desde la matriz hasta las fibras [49], [50], [65]; sin embargo, es importante mencionar que cuando se presenta exceso de agente de acople, la cadena del polímero tiende a romperse y a aumentar el número de cadenas de polímero cortas, que resulta en una mala adhesión entre las cadenas de polímero cortas y las fibras [41].

Por último, se identificó que el agente de acople MAPP es el que muestra mejores resultados en la mayoría de los casos, razón por la cual muchos investigadores lo prefieren, debido a que el agente de acople reduce en gran medida la porosidad de los compuestos. Dicho comportamiento mejora directamente las propiedades mecánicas, al mejorar la dispersión y mejorar la resistencia interfacial gracias al enlace de hidrógeno formado entre la superficie de las fibras y el MAPP [40], [55].

En cuanto a los resultados de las propiedades mecánicas, en primera instancia, se evidencia que una de las propiedades más evaluadas y analizadas por los autores es la resistencia a la tracción. Aquí, el rango de fracción porcentual de fibra utilizada como refuerzo varía entre el 10% y el 40%. Al sobrepasar dicho límite las partículas de las fibras tienden a aglomerarse, a causar mala adhesión interfacial y a generar una deficiencia, en cuanto a la transferencia de tensión desde la matriz al refuerzo, que resulta en grietas [19], [39], [56]. Adicionalmente, al aumentar el contenido de la fibra, se agudiza la formación de microespacios en la región interfacial; esto debido a la escasa humectación de la fibra por la matriz [14], que reduce la resistencia a la tracción.

Asimismo, se evidenció que, en general, las fibras sometidas a tratamientos químicos previos y adición de agentes de acople mejoran la adhesión interfacial, con lo que promueven así la transferencia de estrés de forma más efectiva entre matriz y refuerzo, debido a la formación de enlaces químicos entre los grupos hidroxilos de las fibras y la superficie la matriz [19], [56], [57].

Por otra parte, se encontró que los materiales compuestos reforzados con aserrín, en su mayoría, no presentan un aumento en esta propiedad, dado que es un relleno de forma irregular con poca capacidad para soportar la tensión que se transfiere desde la matriz. Esto genera una unión interfacial bastante deficiente que ocasiona microfisuras en los materiales debido a grandes cantidades de estrés concentrado y que conducen a un valor

decreciente de la resistencia a la tracción [22], [52].

De las tablas 3 a la 8 se agrupan las combinaciones que arrojaron los mejores resultados para las propiedades mecánicas ya mencionadas. En la tabla 3 se destaca que la mejor combinación es la correspondiente a la fibra de cáñamo.

Tabla 3. Mejores resultados de resistencia a la tracción

<i>Fibra</i>	<i>Combinación</i>	<i>Resultado (Mpa)</i>	<i>Ref.</i>
Sisal	Rpp/Sf/MAPP (65/30/5) OBDC	27,54	[39]
Bambú	Rpp/Bf/MAPP (70/20/10)	31,6	[40]
Palmera datilera	(Rpp/Dpf/MA)	30	[45]
Bagazo	(Rhdpe/Bgf/MAPE) (90/10/4,5)	33	[57]
Aserrín	(Rpp/Af/MAPP) (60/40/5)	28,41	[59]
Cáñamo	Rhdpe/Cñf/ (60/40) NaOH	60,2	[44]
F. vacías	(Rpp/Fvf/MA) (70/30/10)	40,15	[47]

Simultáneamente, el módulo de tracción está relacionado de forma estrecha con la resistencia a la tracción, debido a que al aumentar la carga de fibra, se observa un aumento en el módulo de una forma más notoria. Lo anterior se puede comprobar al observar los valores de los módulos consignados en la tabla 3. Además, se identifica que la proporción de fibra para esta propiedad es un poco más amplia, dado que va desde el 10% hasta el 50%. Además, Adicionalmente, los materiales con compuestos con fibras tratadas demuestran un mayor módulo de tracción en comparación con las que no realizan dicho tratamiento. Esto, debido a que dicho tratamiento mejora las características adhesivas de la superficie al producir una topografía de contacto rugosa cuyo resultado es más entrelazamientos mecánicos entre las fibras [44], [45], [56]. Asimismo, las mejores combinaciones para esta propiedad se observan en la tabla 4, donde la

combinación que ofrece mejor resultado es la referente a la fibra de mengkuank.

Tabla 4. Mejores resultados del módulo de tracción

Fibra	Combinación	Resultado (Mpa)	Ref.
Sisal	Rpp/Sf/MAPP (55/40/5) NaOH	2450	[50]
Palmera datilera	Rpet/Dpf/MA (95/5/1,84)	2250	[45]
Bagazo	Rhdpe/Bgf/MAPE (70/30/4,5,)	1585	[57]
Aserrín	Rpp/Af (50/50)	2700	[58]
Cáñamo	Rhdpe/Cñf (60/40) NaOH	2311,2	[44]
Mengku ank	Rpp/Mf/MAPP (60/40) NaOH	5100	[48]
Kenaf	Rpet/Kf (95/5) NaOH	3051	[56]

En cuanto a la resistencia y el módulo de flexión, se puede observar que el rango de proporción de carga de fibra varía entre el 10 % y el 40 %, donde normalmente al aumentar la proporción de fibra, dichas propiedades se incrementan por una mejor absorción de la fuerza de compresión, siempre y cuando exista una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo [44], [52], [62]. Sin embargo, dicha tendencia no se observa del todo y podría atribuirse a la insuficiente unión de la interfaz entre las fibras con la matriz para transferir la resistencia al corte, debido a que dentro de varios de los ensayos experimentales no se incluyó el uso de agentes de acople o tratamientos previos, sabiendo que los mismos aumentan la unión interfacial y la propagación de la tensión de la matriz a la fibra [50], [66]. Asimismo, para la resistencia a la flexión y el módulo de flexión se encuentran las tablas 5 y 6, respectivamente, en las cuales se pueden observar las combinaciones que mejores resultados arrojaron. Se destaca que para cada propiedad se obtuvieron con palmera datilera y sisal.

Tabla 5. Mejores resultados de resistencia a la flexión

Fibra	Combinación	Resultado (Mpa)	Ref.
Sisal	Rpp/Sf/MAPP (55/40/5)	46	[50]

Palmera datilera	Rpet/Dpf/MA (85/15/1,84) NaOH	53,7	[45]
Aserrín	Rpp/Af/MAPP/UV (51/45/3/0)	46,24	[60]
Cáñamo	Rhdpe/Cñf (60/40) NaOH	44,6	[44]
Mengku ank	Rpp/Mf (60/40) NaOH	34,9	[48]
Yerba mate	Rpp/Ymf (80/20)	31	[52]

Tabla 6. Mejores resultados de módulo de flexión

Fibra	Combinación	Resultado (Mpa)	Ref.
Sisal	Rpp/Sf/MAPP (55/40/5) NaOH	3250	[50]
Palmera datilera	Rpet/Dpf/MA (95/5/1,84) NaOH	2460	[45]
Aserrín	Rpp/Af/MAPP/UV(51/45/3/1)	2690	[60]
Yerba Mate	Rpp/Ymf (60/40)	2350	[52]
Mengku ank	Rpp/Mf (60/40) NaOH	3014	[48]

Por su parte, tanto la resiliencia como la resistencia al impacto se ven influenciadas por tres factores, básicamente: 1) el tamaño, pues a medida que disminuye la longitud de la fibra, aumenta el número de extremos de fibra que pueden actuar como punto de inicio de la grieta [48], [56]; 2) el tratamiento previo a cada fibra, que como se ha venido mencionando mejora la compatibilidad entre fibra y matriz, al tiempo que evita la disminución de la interfaz entre la fibra y la matriz y la creación de conexiones sueltas entre la fibra y la matriz [46], y 3) la adición de agentes de acople.

En cuanto a la resistencia al impacto, a medida que aumenta la proporción de fibra, dicha propiedad tiende a reducirse debido a la introducción de regiones de mala adherencia interfacial y concentración de tensión y estrés en el compuesto, porque las partículas reducen tanto la movilidad de las cadenas de polímero como la absorción de energía del compuesto y se da inicio al crecimiento de grietas [20], [46], [52]. Cabe mencionar que dentro de la revisión hecha dos de las

investigaciones encontradas no siguen el anterior comportamiento, pues durante el tratamiento de las fibras se incluyó cloruro de o-hidroxibenceno diazonio (OBDC). Este contribuye a reducir la intensidad del grupo OH, a eliminar un porcentaje más alto de impurezas propias de la fibra y a modificar su superficie, al generar una más rugosa, que resulta en una mayor compatibilidad con la matriz reciclada [39], [49]. Adicionalmente, las mejores combinaciones para esta propiedad se encuentran en la tabla 7, con la incidencia del tratamiento con OBDC, tal como se mencionó. Esta combinación con sisal es la que demuestra mejor resistencia al impacto.

Tabla 7. Mejores resultados de resistencia al impacto

<i>Fibra</i>	<i>Combinación</i>	<i>Resultado (J/m)</i>	<i>Ref.</i>
Sisal	RPP/SF/MAPP (65/30/5) OBDC	86,47	[49]
Aserrín	Rpp/PA12/P353 (66,5/28,5/5)	38	[53]
Mengkuank	Rpp/Mf/MAPP (60/40) NaOH	30,6	[48]

En relación con la resiliencia al impacto, se demuestra un comportamiento inverso a la resistencia al impacto. A medida que aumenta el contenido de fibra (del 20% al 30%), dicha propiedad mejora; lo anterior con algunas excepciones, dado que tal como se mencionó, el tamaño de la fibra influye de gran manera, debido a que puede ocasionar en algunos casos que esta propiedad no mejore al trabajar con tamaños de fibra muy pequeños (inferiores a 5 mm) [56], [67]. En la tabla 8 se agrupan las combinaciones más favorables para el aumento de la resiliencia al impacto, donde se destaca la correspondiente a la fibra de cáñamo.

Tabla 8. Mejores resultados de resiliencia al impacto

<i>Fibra</i>	<i>Combinación</i>	<i>Resultado (kJ/m²)</i>	<i>Referencia</i>
Sisal	Bopp/Rldpe/Sf (40/60/15)	48,68	[51]
Palmera	Rpet/Dpf/MA	13,8	[45]

datilera	(85/15/1,84) NaOH		
Aserrín	Rpp/Af (90/20)	16,2	[58]
Cáñamo	Rhdpe/Cñf (70/30) NaOH	51,1	[44]

Además, se encontró que tanto la deformación por tensión a la rotura como la elongación son las propiedades mecánicas menos estudiadas de acuerdo con la revisión realizada. Sin embargo, se puede observar que las dos siguen un comportamiento similar con la adición de fibra. Las propiedades tienden a disminuir, debido a que la rigidez de las fibras restringe la movilidad de la cadena de polímero [54], [68].

Por último, en cuanto al análisis de correlación estadístico, se determinó que, debido al déficit de datos causado por la variabilidad de cada investigación, no era posible realizar un análisis que abarcara todas las variables incluidas en el proceso de fabricación; por este motivo, se optó por trabajar únicamente con el tamaño de fibra (única variable tenida en cuenta en la mayoría de los artículos) y las propiedades mecánicas, con el fin de identificar posibles tendencias y comportamientos. Así, tal como se observa en las figuras 1 a 8, no se evidencia que al aumentar el tamaño de las fibras las propiedades mecánicas mejoren proporcionalmente, que era el comportamiento esperado dadas las investigaciones encontradas. Se puede inferir que dicho comportamiento se ve alterado ya que los ensayos realizados no estaban bajo las mismas condiciones, es decir, variables como la matriz, el tipo de refuerzo, los pretratamientos aplicados y los agentes de acople con sus debidas proporciones variaron de investigación a investigación, e impidieron una comparación idónea para cada una de las combinaciones. Sin embargo, cabe resaltar que los ensayos en los cuales se aplicaba pretratamiento a las fibras y se trabajaba con agentes de acople tienden a mejorar sus propiedades mecánicas al aumentar el tamaño de fibra.

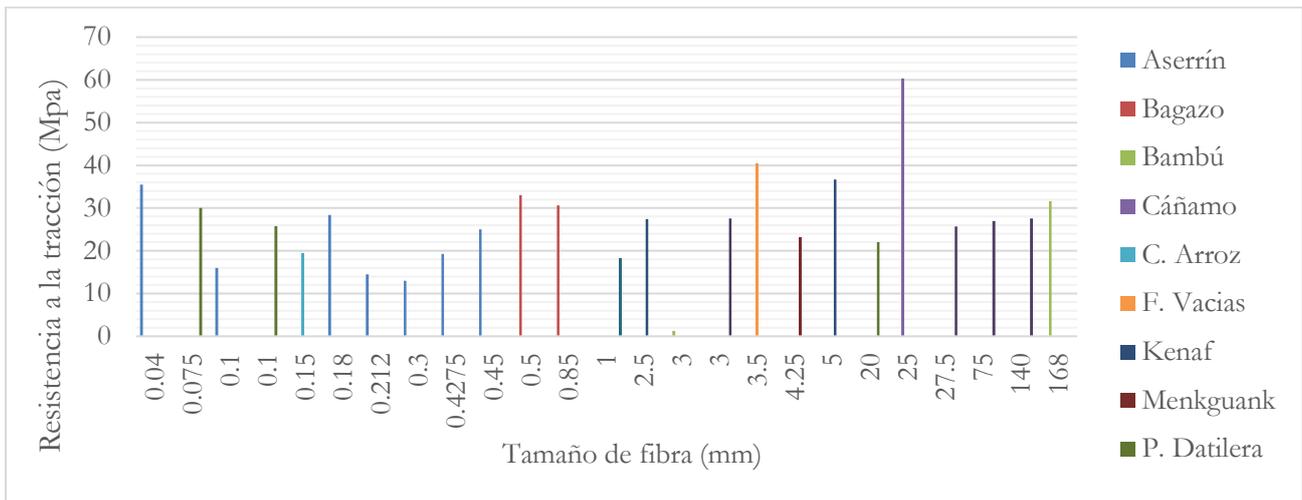


Figura 1. Correlación entre tamaño de fibra y resistencia a la tracción

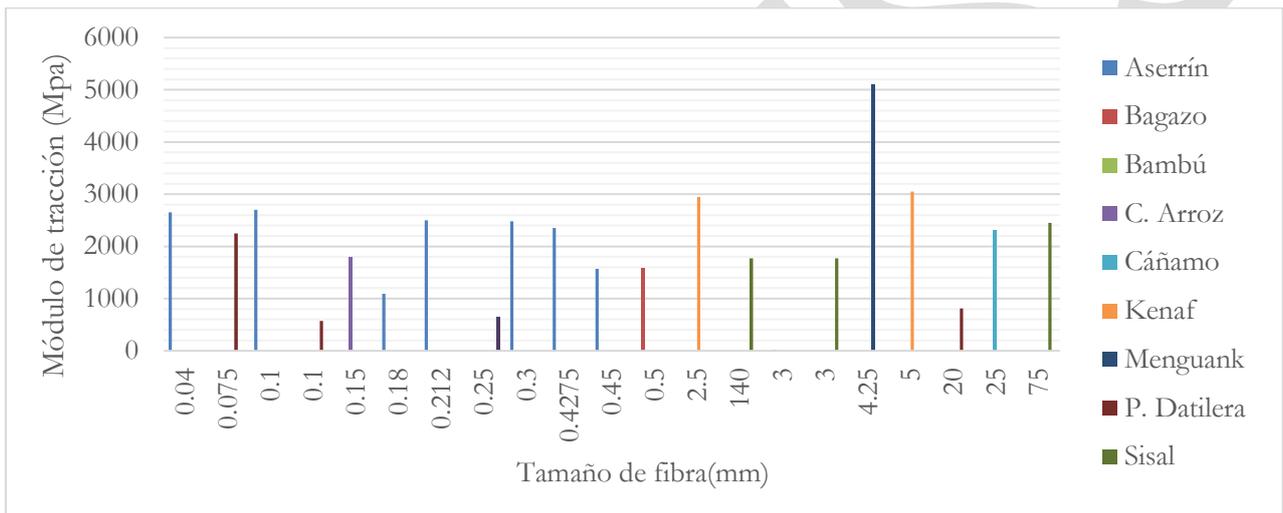


Figura 2. Correlación entre tamaño de fibra y módulo de tracción

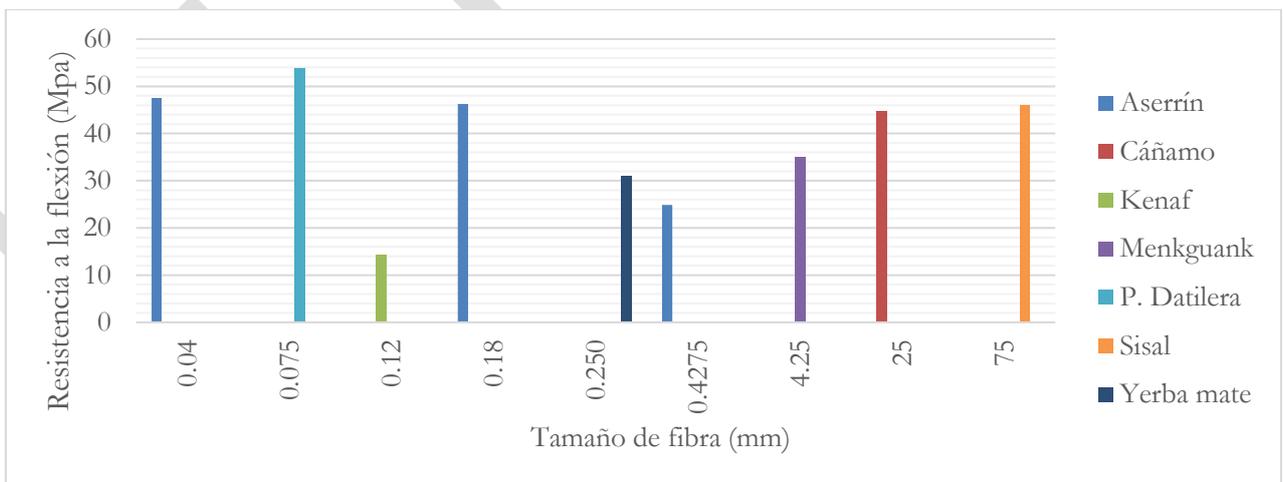


Figura 3. Correlación entre tamaño de fibra y resistencia a la flexión

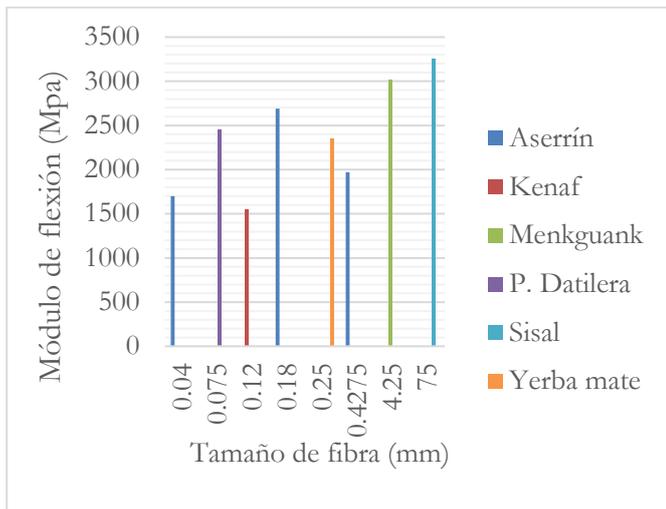


Figura 4. Correlación entre tamaño de fibra y módulo de flexión

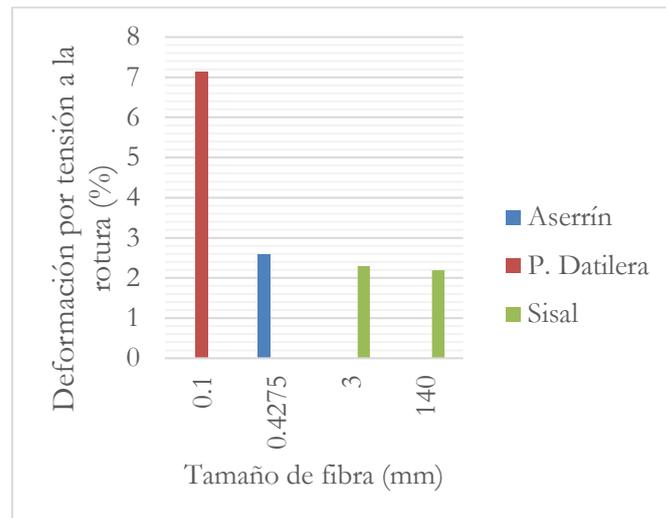


Figura 7. Correlación entre tamaño de fibra y deformación por tensión a la rotura

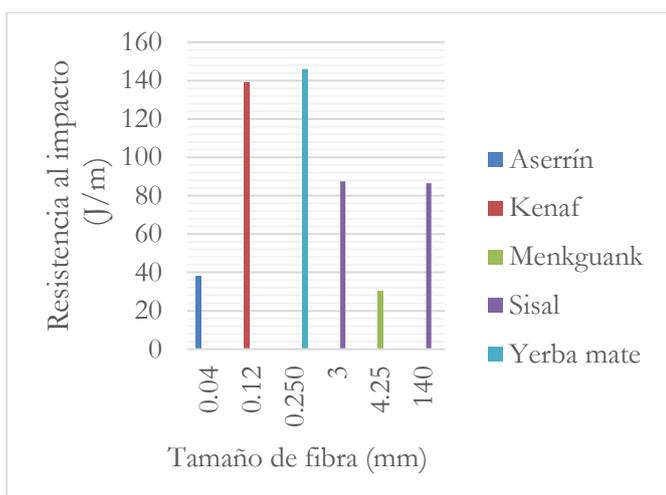


Figura 5. Correlación entre tamaño de fibra y resistencia al impacto

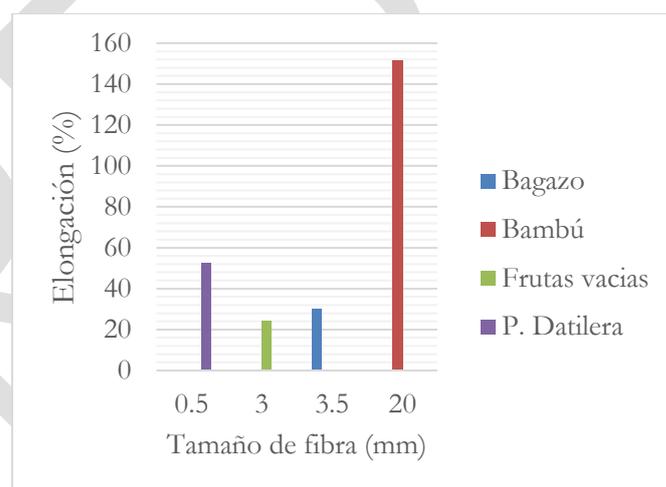


Figura 8. Correlación entre tamaño de fibra y elongación

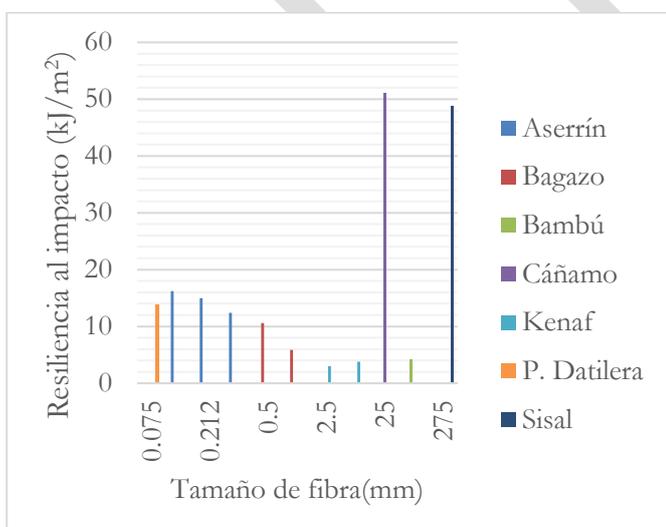


Figura 6. Correlación entre tamaño de fibra y resiliencia al impacto

De acuerdo con las figuras presentadas, el comportamiento mecánico de los materiales compuestos reforzados con fibras depende del tipo de fibra lignocelulósica, teniendo en cuenta que presentan diversos diámetros y, por tanto, las longitudes críticas de las fibras son diferentes. Ello permite tener los mismos valores de propiedades mecánicas para diferentes longitudes de fibras en materiales compuestos.

Entonces, el presente artículo de revisión evidencia múltiples posibilidades de mezclas poliméricas en cuanto a su composición; una variedad de alternativas para la síntesis de los materiales, que pueden ir desde técnicas sencillas de laboratorio hasta procesos industriales para su producción en grandes

cantidades, y resultados positivos de viabilidad técnica en la obtención de mezclas plásticas en cuanto a sus propiedades. Así, este se convierte en un campo de investigación atractivo no solo por la obtención de materiales compuestos con propiedades que posibilitan su utilización en diferentes sectores, sino que también se convierte en una alternativa favorecedora para el ambiente, que aporta a objetivos y políticas globales de economía circular en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, dada la integración de residuos al ciclo productivo. Ello implica la minimización de la presión sobre los recursos naturales, al disminuir el consumo de materias primas vírgenes, así como el posibilitar una alternativa para el aprovechamiento de residuos sólidos que en su mayoría son incinerados, depositados en ecosistemas o enviados a rellenos sanitarios.

Conclusiones

En el presente artículo se identificaron algunas de las mezclas existentes entre polímeros reciclados y fibras naturales. Se confirmó la alta disponibilidad de dichas fibras en la agroindustria, las cuales en su gran mayoría son poco aprovechadas, a pesar de poseer buenas propiedades mecánicas y ser altamente competitivas con respecto a las fibras inorgánicas. Esto, sumado a su bajo costo, biodegradabilidad y cantidad de energía requerida para su fabricación. También se encontró que la adición de fibra óptima para que la mayoría de las propiedades mecánicas mejoren es del 15% al 40% en peso; asimismo, que variables como el pretratamiento y la adición de agentes de acople son fundamentales para que dichas propiedades mejoren entre un 30% y un 40%, en su mayoría, esto teniendo en cuenta que los pretratamientos más efectivos son los realizados con NaOH y OBDC y que los agentes de acople que contienen MA en su composición son los más eficientes.

Además, se evidenció que al aumentar el tamaño de la fibra, las propiedades mecánicas mejoran, pero esto condicionado

por las variables mencionadas. En cuanto a los métodos de fabricación de los compuestos, los más usados son moldeo por compresión e inyección.

Por otra parte, propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y a la flexión, sus respectivos módulos y la resiliencia al impacto tienden a un comportamiento similar con respecto al aumento de la fibra hasta cierto punto (30% a 40% de peso), contrario a propiedades como la resistencia al impacto, la deformación por tensión a la rotura y la elongación, que al aumentar la carga de fibra, dichas propiedades no mejoran.

Referencias

- [1] D. B. Rocha y D. d S. Rosa, "Coupling effect of starch coated fibers for recycled polymer/wood composites", *Compos. B Eng.*, vol. 172, pp. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.052>
- [2] M. Tufan et al., "Effects of different filler types on decay resistance and thermal, physical, and mechanical properties of recycled high-density polyethylene composites", *Iran Polym. J.*, vol. 25, n.º 7, pp. 615-622, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13726-016-0452-6>
- [3] M. Poletto, "Maleated soybean oil as coupling agent in recycled polypropylene/wood flour composites: mechanical, thermal, and morphological properties", *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 32, n.º 8, pp. 1056-1067, 2019. <https://doi.org/10.1177/0892705718785707>
- [4] J. Anggono et al., "Deformation and failure of sugarcane bagasse reinforced PP", *Eur. Polym. J.*, vol. 112, pp. 153-160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.12.033>
- [5] M. F. V. Marques et al., "Thermal and mechanical properties of sustainable composites reinforced with natural fibers", *J. Polym. Environ.*, vol. 23, n.º 2, pp. 251-260, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0687-2>
- [6] M. K. Lila et al., "A recyclability study of bagasse fiber reinforced polypropylene composites", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 152,

- pp. 272-279, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.001>
- [7] M. Hughes y M. Hughes, "Defects in natural fibres: their origin, characteristics and implications for natural fibre-reinforced composites", *J. Mater. Sci.*, vol. 47, n.º 2, pp. 599-609, 2012.
<https://doi.org/10.1007/s10853-011-6025-3>
- [8] A. Komuraiah, N. S. Kumar y B. D. Prasad, "Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties", *Mech. Compos. Mater.*, vol. 50, n.º 3, pp. 359-376, 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11029-014-9422-2>
- [9] M. Rokbi et al., "Effect of processing parameters on tensile properties of recycled polypropylene based composites reinforced with jute fabrics", *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, vol. 3, n.º 2, pp. 144-149, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.09.005>
- [10] A. Lima et al., "Recycled polyethylene composites reinforced with jute fabric from sackcloth: part I-preparation and preliminary assessment", *J. Polym. Environ.*, vol. 20, n.º 1, pp. 245-253, 2012.
<https://doi.org/10.1007/s10924-011-0373-6>
- [11] P. Naldony, T. H. Flores-Sahagun y K. G. Satyanarayana, "Effect of the type of fiber (coconut, eucalyptus, or pine) and compatibilizer on the properties of extruded composites of recycled high density polyethylene", *J. Compos. Mater.*, vol. 50, n.º 1, pp. 45-56, 2016.
<https://doi.org/10.1177/0021998315570141>
- [12] M. D. Erdman y B. A. Erdman, "Arrowroot (*Maranta arundinacea*), food, feed, fuel, and fiber resource", *Econ. Bot.*, vol. 38, n.º 3, pp. 332-341, 1984.
<https://doi.org/10.1007/BF02859011>
- [13] R. S. Chen et al., "Effect of polymer blend matrix compatibility and fibre reinforcement content on thermal stability and flammability of ecomposites made from waste materials", *Thermochim. Acta*, vol. 640, pp. 52-61, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.08.005>
- [14] M. N. Islam and M. S. Islam, "Characterization of chemically modified sawdust-reinforced recycled polyethylene composites", *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, n.º 8, pp. 1135-1153, 2015.
<https://doi.org/10.1177/0892705713503671>
- [15] S. K. Najafi et al., "Water absorption behavior of composites from sawdust and recycled plastics", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 26, n.º 3, pp. 341-348, 2007.
<https://doi.org/10.1177/0731684407072519>
- [16] N. Hidayah Marzuki et al., "Mechanical properties of kenaf fiber and montmorillonite reinforced recycled polyethylene terephthalate/recycled polypropylene", *Mater. Today Proc.*, vol. 5, n.º 10, pp. 21879-21887, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.046>
- [17] D. D. P. Moreno, D. Hirayama y C. Saron, "Accelerated aging of pine wood waste/recycled LDPE composite", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 149, pp. 39-44, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.014>
- [18] B. Koohestani et al., "Comparison of different natural fiber treatments: a literature review", *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n.º 1, pp. 629-642, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-1890-9>
- [19] K. Zadeh et al., "Effects of date palm leaf fiber on the thermal and tensile properties of recycled ternary polyolefin blend composites", *Fibers Polym.*, vol. 18, n.º 7, pp. 1330-1335, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s12221-017-1106-9>
- [20] M. R. Islam, M. D. H. Beg y A. Gupta, "Characterization of alkali-treated kenaf fibre-reinforced recycled polypropylene composites", *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 27, n.º 7, pp. 909-932, 2014.
<https://doi.org/10.1177/0892705712461511>
- [21] C. Wu y C. Wu, "Enhanced Interfacial Adhesion and Characterisation of Recycled Natural Fibre-Filled Biodegradable Green Composites", *J. Polym. Environ.*, vol. 26, n.º 7, pp. 2676-2685, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s10924-017-1160-9>
- [22] I. Ahmad y T. M. Mei, "Mechanical and morphological studies of Rubber Wood Sawdust-Filled UPR composite based on recycled PET", *Polym.-Plast. Tech. Eng.*, vol. 48, n.º 12, pp. 1262-1268, 2009.
<https://doi.org/10.1080/03602550903204105>
- [23] P. S. Sari et al., "Effect of plasma modification of polyethylene on natural fibre composites prepared via rotational moulding", *Compos. B Eng.*, vol. 177, pp. 107344, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107344>

- [24] R. M. de Sá, C. S. de Miranda y N. M. José, "Preparation and characterization of nanowhiskers cellulose from fiber arrowroot (*Maranta arundinacea*)", *Mater. Res.*, vol. 18, n.º 2, pp. 225-229, 2015. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.366214>
- [25] J. A. Foulk et al., "Enzyme-retted flax fiber and recycled polyethylene composites", *J. Polym. Environ.*, vol. 12, n.º 3, pp. 165-171, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:JOOE.0000038548.73494.59>
- [26] Y. Martínez López et al., "Production of wood-plastic composites using *cedrela odorata* sawdust waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products - A sustainable approach for cleaner production in Cuba", *J. Clean. Prod.*, vol. 244, pp. 118723, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>
- [27] A. Lima, S. Monteiro y K. Satyanarayana, "Recycled polyethylene composites reinforced with jute fabric from Sackcloth: Part II-impact strength evaluation", *J. Polym. Environ.*, vol. 19, n.º 4, pp. 957-965, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10924-011-0347-8>
- [28] M. Cosnita, C. Cazan y A. Duta, "Interfaces and mechanical properties of recycled rubber-polyethylene terephthalate-wood composites", *J. Compos. Mater.*, vol. 48, n.º 6, pp. 683-694, 2014. <https://doi.org/10.1177/0021998313476561>
- [29] A. C. N. Singleton et al., "On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite", *Compos. B*, vol. 34, n.º 6, pp. 519-526, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00042-8)
- [30] A. Ogah y A. Ogah, "Characterization of sorghum bran/recycled low density polyethylene for the manufacturing of polymer composites", *J. Polym. Environ.*, vol. 25, n.º 3, pp. 533-543, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0830-3>
- [31] J. R. Araújo, W. R. Waldman and M. A. De Paoli, "Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect", *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, n.º 10, pp. 1770-1775, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.021>
- [32] D. K. Rajak et al., "Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials", *J. Mater. Res. Tech.*, vol. 8, n.º 6, pp. 6354-6374, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
- [33] E. Corradini et al., "Interfacial behavior of composites of recycled poly(ethylene terephthalate) and sugarcane bagasse fiber", *Polym. Test.*, vol. 28, n.º 2, pp. 183-187, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.11.014>
- [34] M. J. P. Macedo et al., "Composites from recycled polyethylene and plasma treated kapok fibers", *Cellulose*, vol. 27, n.º 4, pp. 2115-2134, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02946-4>
- [35] A. Arsad et al., "The influence of kenaf fiber as reinforcement on recycled polypropylene/recycled polyamide-6 composites", *Int. J. Plast. Technol.*, vol. 17, n.º 2, pp. 149-162, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12588-013-9055-7>
- [36] R. H. Cruz-Estrada et al., "Potential use of waste from tree pruning and recovered plastic to obtain a building material: Case study of Merida, Mexico", *Waste Manag. Res.*, pp. 734242, 2020. <https://doi.org/10.1177/0734242X20928404>
- [37] N. Hidayah Marzuki et al., "Mechanical properties of kenaf fiber and montmorillonite reinforced recycled polyethylene terephthalate/recycled polypropylene", *Mater. Today Proc.*, vol. 5, n.º 10, pp. 21879-21887, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.07.046>
- [38] M. N. Islam y M. S. Islam, "Characterization of chemically modified sawdust-reinforced recycled polyethylene composites", *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, n.º 8, pp. 1135-1153, 2015. <https://doi.org/10.1177/0892705713503671>
- [39] S. Nayak, G. Dixit y K. Appu Kuttan, "Mechanical properties of eco-friendly recycled polymer composites: a comparative study of theoretical and experimental results", *Int. J. Plast. Technol.*, vol. 17, n.º 1, pp. 75-93, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12588-013-9050-z>
- [40] T. P. Nguyen, C. Sollogoub y A. Guinault, "Relationship between fiber chemical treatment and properties of recycled pp/bamboo fiber composites", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, n.º 21, pp. 3244-3256, 2010. <https://doi.org/10.1177/0731684410370905>

- [41] P. Noorunnisa Khanam y M. A. AlMaadeed, "Improvement of ternary recycled polymer blend reinforced with date palm fibre", *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 532-539, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.033>
- [42] R. S. Chen y S. Ahmad, "Mechanical performance and flame retardancy of rice husk/organoclay-reinforced blend of recycled plastics", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 198, pp. 57-65, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.05.054>
- [43] Y. Lei et al., "Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites", *Compos. A App. Sci. Manuf.*, vol. 38, n.º 7, pp. 1664-1674, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.001>
- [44] N. Lu y S. Oza, "A comparative study of the mechanical properties of hemp fiber with virgin and recycled high density polyethylene matrix", *Compos. B Eng.*, vol. 45, n.º 1, pp. 1651-1656, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.076>
- [45] A. Dehghani et al., "Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites", *Mater. Des. (1980-2015)*, vol. 52, pp. 841-848, 2013.
- [46] M. J. Taufiq, M. R. Mansor y Z. Mustafa, "Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend", *Compos. Struct.*, vol. 189, pp. 510-515, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.090>
- [47] O. A. Saputra et al., "Improvement of thermo-mechanical properties of short natural fiber reinforced recycled polypropylene composites through double step grafting process", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 75, pp. 12023, 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012023>
- [48] M. Z. Abdullah y N. H. Che Aslan, "Performance evaluation of composite from recycled polypropylene reinforced with mengkuang leaf fiber", *Resources*, vol. 8, n.º 2, pp. 97, 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8020097>
- [49] A. Gupta et al., "Mechanical and thermal degradation behavior of sisal fiber (SF) reinforced recycled polypropylene (RPP) composites", *Fibers Polym.*, vol. 15, n.º 5, pp. 994-1003, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-0994-1>
- [50] M. Naushad et al., "Mechanical and damage tolerance behavior of short sisal fiber reinforced recycled polypropylene biocomposites", *J. Compos. Mater.*, vol. 51, n.º 8, pp. 1087-1097, 2017. <https://doi.org/10.1177/0021998316658945>
- [51] K. Rohit and S. Dixit, "Tensile and Impact Behaviour of Thermoplastic BOPP/Milk Pouches Blends Reinforced with Sisal Fibers", *Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.*, vol. 33, n.º 3, pp. 139-152, 2017. <https://doi.org/10.1177/147776061703300302>
- [52] A. L. Catto et al., "Characterization of polypropylene composites using yerba mate fibers as reinforcing filler", *Compos. B Eng.*, vol. 174, pp. 106935, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106935>
- [53] E. Erbas Kiziltas, A. Kiziltas and E. C. Lee, "Structure and properties of compatibilized recycled polypropylene/recycled polyamide 12 blends with cellulose fibers addition", *Polym. Compos.*, vol. 39, n.º 10, pp. 3556-3563, 2018. <https://doi.org/10.1002/pc.24376>
- [54] K. M. Zadeh, D. Ponnamma y M. Al Ali Al-Maadeed, "Date palm fibre filled recycled ternary polymer blend composites with enhanced flame retardancy", *Polym. Test.*, vol. 61, pp. 341-348, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.05.006>
- [55] K. B. Adhikary, S. Pang y M. P. Staiger, "Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)", *Compos. B Eng.*, vol. 39, n.º 5, pp. 807-815, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005>
- [56] G. N. Farahani, I. Ahmad y Z. Mosadeghzad, "Effect of fiber content, fiber length and alkali treatment on properties of kenaf fiber/UPR composites based on recycled PET wastes", *Polym.-Plast. Tech. Eng.*, vol. 51, n.º 6, pp. 634-639, 2012. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.659314>
- [57] A. A. El-Fattah et al., "The effect of sugarcane

- bagasse fiber on the properties of recycled high density polyethylene", *J. Compos. Mater.*, vol. 49, n.º 26, pp. 3251-3262, 2015. <https://doi.org/10.1177/0021998314561484>
- [58] Khalil, H. P. S. A et al., "Recycle Polypropylene (RPP) - Wood Saw Dust (WSD) Composites - Part 1: the effect of different filler size and filler loading on mechanical and water absorption properties", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 25, n.º 12, pp. 1291-1303, 2006. <https://doi.org/10.1177/0731684406062060>
- [59] A. R. Kakroodi et al., "Mechanical properties of recycled polypropylene/SBR rubber crumbs blends reinforced by birch wood flour", *Polym. Polym. Compos.*, vol. 20, n.º 5, pp. 439-444, 2012. <https://doi.org/10.1177/096739111202000503>
- [60] C. Homkhiew, T. Ratanawilai y W. Thongruang, "Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour", *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 28, n.º 2, pp. 179-194, 2015. <https://doi.org/10.1177/0892705712475019>
- [61] S. P. Dinesh, "Structure and properties of recycled bamboo fiber reinforced chemically functionalized ethylene propylene rubber composites", *Polym. Polym. Compos.*, pp. 96739111989411, 2019. <https://doi.org/10.1177/0967391119894112>
- [62] J. O. Agunsoye y V. S. Aigbodon, "Bagasse filled recycled polyethylene bio-composites: Morphological and mechanical properties study", *Results Phys.*, vol. 3, pp. 187-194, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2013.09.003>
- [63] C. Tan, I. Ahmad y M. Heng, "Characterization of polyester composites from recycled polyethylene terephthalate reinforced with empty fruit bunch fibers", *Mater. Des.*, vol. 32, n.º 8, pp. 4493-4501, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.037>
- [64] T. Zi-Ni et al., "Characteristics of Metroxylon sagu Resistant Starch Type III as Prebiotic Substance", *J. Food Sci.*, vol. 80, n.º 4, pp. H875-H882, 2015. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12817>
- [65] K. Das et al., "Development of recycled polypropylene matrix composites reinforced with waste jute caddies", *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 29, n.º 2, pp. 201-208, 2010. <https://doi.org/10.1177/0731684408096929>
- [66] H. Younesi-Kordkheili y A. Pizzi, "Ionic liquid-modified lignin as a bio-coupling agent for natural fiber- recycled polypropylene composites", *Compos. B Eng.*, vol. 181, pp. 107587, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107587>
- [67] H. Hong et al., "Transform Rice Husk and recycled polyethylene into high performance composites: using a novel compatibilizer to infiltratively enhance the interfacial interactions", *Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.*, vol. 32, n.º 4, pp. 253-268, 2016. <https://doi.org/10.1177/147776061603200405>
- [68] K. M. Zadeh, D. Ponnamma y M. Al Ali Al-Maadeed, "Date palm fibre filled recycled ternary polymer blend composites with enhanced flame retardancy", *Polym. Test.*, vol. 61, pp. 341-348, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.05.006>