

FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO EN MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

NATURAL FIBERS AS REINFORCEMENT IN POLYMER MATRIX COMPOSITE
MATERIALS

Patricia Luna, Juan M. Lizarazo-Marriaga

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

(Recibido: 06/2022. Aceptado: 06/2022)

Resumen

Debido a la crisis ambiental que atraviesa la humanidad, actualmente se vienen realizando diversas investigaciones encaminadas a encontrar alternativas sustentables para diferentes procesos industriales. En este sentido, las fibras naturales se han convertido en un recurso atractivo para diferentes industrias, dentro de las cuales se puede destacar la industria de los materiales compuestos. Las fibras naturales son recursos renovables que pueden ser obtenidos de animales o vegetales y presentan múltiples ventajas, como su bajo costo y peso, biodegradabilidad y altas propiedades específicas. Este documento constituye una revisión de algunos aspectos relevantes para tener en cuenta en el empleo de fibras naturales en la industria de los compuestos, como son su origen, composición química, metodología de extracción, propiedades físicas y mecánicas, y algunos tratamientos necesarios para mejorar la adherencia cuando se emplean como refuerzo de matrices poliméricas. Además, se destacan algunos de los resultados obtenidos en una investigación enfocada a proporcionar aspectos técnicos para el empleo de fibras de bambú guadua *angustifolia* como material de refuerzo. Cabe resaltar que la revisión presentada en este documento se centra en fibras de origen vegetal.

Palabras clave: fibras naturales, materiales compuestos, tratamientos de compatibilización, guadua *angustifolia*.

Abstract

Due to the environmental crisis that humanity is going through, several researches are currently being carried out to find sustainable alternatives for different industrial processes. In this sense, natural fibers have become a valuable resource for different industries, including the composite industry. Natural fibers are renewable resources that can be obtained from animals or plants and have multiple advantages, such as low cost and weight, biodegradability and high specific properties. This paper is a review of some relevant aspects to consider in the use of natural fibers in the composites industry, such as their origin, chemical composition, extraction methodology, physical and mechanical properties, and some necessary treatments to improve adhesion when they are used as reinforcement of polymeric matrices. In addition, some of the results obtained in a research focused on providing technical aspects for the use of bamboo fibers guadua *angustifolia* as reinforcement material are highlighted. It should be noted that the review presented in this paper focuses on plant-based fibers.

Keywords: natural fibers, composite materials, compatibilization treatments, Guadua *angustifolia*.

Introduction

Los materiales pueden clasificarse como metálicos, poliméricos, elastómeros, cerámicos, vidrios y compuestos [1]. Los compuestos se forman a partir de dos o más constituyentes de las otras categorías, que tienen características físicas, químicas y mecánicas bien diferenciadas, las cuales, en conjunto, producen material con características y propiedades que no se encuentran en los constituyentes [2].

En general, los materiales compuestos se caracterizan por tres fases claramente diferenciadas: una fase continua llamada matriz; una fase discontinua llamada refuerzo y la interfase, que corresponde a la superficie donde matriz y refuerzo entran en contacto, lugar donde ocurren las interacciones físico-mecánicas entre los constituyentes [3].

Los materiales cerámicos, metálicos y poliméricos se emplean como matrices; las matrices cerámicas y metálicas son empleadas principalmente en la industria aeroespacial, mientras que las polimeras son ampliamente empleadas en industrias tales como automotriz, muebles y construcción, entre otras, debido a su versatilidad, facilidad de fabricación y bajo costo [4].

En cuanto al material de refuerzo, se emplea una amplia variedad de fibras, dentro de las que se destacan las fibras de carbono, vidrio, aramida y metálicas, entre otras [5]. Sin embargo, la crisis ambiental que se vive en este momento, provocada por el crecimiento industrial indiscriminado, ha aumentado el interés en la investigación y uso a nivel industrial de fibras provenientes de recursos naturales y renovables [6, 7]. De esta forma, fibras de origen animal o vegetal [8] se emplean como refuerzo de materiales compuestos, principalmente con matriz polimérica. La revisión presentada en este artículo se centra en las fibras de origen vegetal, las cuales se llamarán “fibras naturales” de forma general.

Existen múltiples ventajas de usar fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos, dentro de las que se destacan su baja densidad, alta resistencia y rigidez específica, abundante disponibilidad y bajo costo [9]. De acuerdo con Joshi *et al.* [10], los compuestos reforzados con fibras naturales presentan las siguientes ventajas: (1) la producción de fibra natural produce menores impactos ambientales en comparación con la producción de fibras sintéticas; (2) tienen mayor contenido de fibra para un rendimiento equivalente, con lo cual se reduce la cantidad necesaria de matriz, que en la mayoría de los casos son altamente contaminantes y (3) la incineración al final de la vida útil de las fibras naturales genera créditos de energía y carbono. Así, el empleo de este tipo de fibras

en la industria de los compuestos generaría impactos positivos con miras a una economía circular [11].

Peças *et al.* [12] realizaron un análisis bibliométrico que reveló que entre los años 2016 y 2018 la fibra de algodón tuvo el mayor número de publicaciones científicas realizadas, con 427 artículos encontrados en la base de datos *Science Direct*, seguida por la fibra de piña (379 artículos) y la fibra de bambú (275 artículos). De acuerdo con los autores, la principal razón del gran número de investigaciones usando estas fibras se debe a que existen grandes áreas plantadas disponibles alrededor del planeta.

Origen y clasificación

Dependiendo de su uso, las plantas pueden clasificarse como primarias o secundarias, siendo las primeras aquellas que fueron plantadas para extraer sus fibras, tales como el algodón, lino, yute, fique y cáñamo, entre otras. Las plantas secundarias son aquellas cuyas fibras son obtenidas como un producto secundario, por ejemplo maíz, arroz, bagazo de caña de azúcar, piña y coco, entre otras [13].

Las fibras naturales comúnmente se clasifican a partir de la parte de la planta de donde son obtenidas. Es así que pueden ser fibras del tallo, de las hojas o de las semillas [14], tal como se muestra en la Tabla 1. Además, en la misma tabla se incluye la producción anual mundial de algunas fibras.

Fibra	Origen	Producción mundial (10^6)ton
Algodón	Semilla	18,5
Bagazo de caña de azúcar	Tallo	75
Bambú	Tallo	30
Cáñamo	Tallo	0,22
Fique	Hojas	0,36
Madera	Tallo	1750
Yute	Tallo	2,5

TABLA 1. *Origen y producción mundial anual de diferentes fibras naturales [13, 15, 16].*

Composición química y estructura celular

En general, los principales componentes de las fibras naturales son celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, están presentes algunos componentes no celulósicos, como pectina, ceras, proteínas, ceniza y sales inorgánicas, entre otros [15, 17]. De acuerdo con John *et al.* [18], las fibras naturales pueden considerarse compuestos fibrosos de celulosa unidas por una matriz de lignina y hemicelulosa. Factores como la edad, origen y condiciones climáticas durante el crecimiento de la planta, así como el proceso de obtención, determinan el porcentaje de los componentes [19].

La Tabla 2 presenta la composición química de algunas fibras naturales. Las proporciones de cada uno de los principales componentes afectan su comportamiento mecánico (i.e resistencia a la tensión y rigidez), degradación térmica y capacidad de absorción de agua [16, 20–23]. La Figura 1 muestra la dependencia que hay entre estas propiedades y la composición química de las fibras.

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceras (%)	Ceniza (%)
Bambú	26-43	30	28	-	-
Banano	64	20	5	- 1,2	-
Algodón	95	2	1	0,4	-
Lino	70-73	18-20	2	6	-
Madera	30-64	20-40	14-37	0,1-8,5	-
Cáñamo	70	22	6	2	-

TABLA 2. Composición química de algunas fibras naturales [14, 16, 18, 22, 24].



FIGURA 1. Dependencia entre la composición química y algunas propiedades de las fibras naturales. Adaptado de Rangappa *et al.* [16].

En cuanto a la estructura celular, las fibras naturales se caracterizan por una región de celulosa cristalina, donde las células están

altamente ordenadas, y una segunda región de celulosa amorfa, caracterizada por células no ordenadas. Estas dos regiones están interconectadas por fragmentos de hemicelulosa y lignina [25, 26]. La Figura 2 muestra la representación esquemática de la estructura celular de las fibras naturales, donde se pueden diferenciar varias capas, desde adentro hacia afuera: la estructura central (lumen); la pared secundaria (conformada por tres capas: S1, S2 y S3, conocidas como capa externa, media e interna, respectivamente); la pared primaria y la laminilla media. La celulosa amorfa se encuentra en la pared primaria [22], mientras que la celulosa cristalina está en la pared secundaria [19].

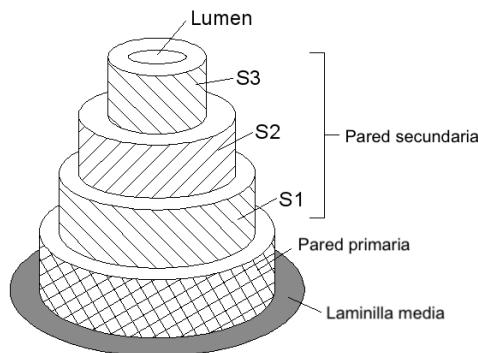


FIGURA 2. Representación esquemática de la estructura celular de las fibras naturales. Adaptado de Luna [27].

Métodos de extracción

Existen cuatro métodos para la obtención de fibras naturales: biológicos [28], mecánicos, químicos, y químico-mecánicos [29]. Procedimientos como la explosión de vapor, la vaporización térmica, la trituración y la separación en molinos son empleados dentro de la categoría de métodos mecánicos [30]. El propósito principal de los métodos químicos es separar los principales componentes químicos de las fibras naturales [28] y son eficientes para separar la hemicelulosa y la lignina de la celulosa [30]. Algunos procedimientos, como el desgomado y la Mercerización, son los más comunes dentro de esta categoría [31].

Por otro lado, las metodologías biológicas emplean bacterias y otros microorganismos para descomponer la lignina [28]. Los procedimientos mecánicos y biológicos son más benéficos para el medio ambiente debido a que no generan residuos químicos nocivos.

Por otra parte, con el uso de las metodologías biológicas, la separación de las fibras tarda entre dos a tres semanas [28], siendo poco atractivas para aplicaciones industriales. Así mismo, las metodologías mecánicas pueden generar grandes daños y defectos en el material obtenido, afectando sus propiedades mecánicas. Asimismo, las metodologías químicas también pueden disminuir las propiedades mecánicas del material obtenido, pues afectan el proceso de transferencia de esfuerzos entre las microfibrillas que conforman la fibra debido a la remoción excesiva de hemicelulosa y lignina [26].

Es así que la combinación de metodologías químicas y mecánicas surgen como una alternativa eficiente para la obtención de fibras naturales, sobretodo cuando serán obtenidas de materiales con alta dureza. La investigación realizada por Luna *et al.* [27] estableció una metodología químico-mecánica para la obtención de fibras de bambú *Guadua angustifolia* (guadua), material caracterizado por su alta dureza [32]. El procedimiento comienza con el corte del culmo (tallo) de la guadua en segmentos longitudinales, los cuales se sumergen en una solución de hidróxido de sodio al 2,5 % caliente a 80° por 3 horas; este proceso tiene como objetivo ablandar el material. Posteriormente, las tiras son pasadas por una máquina de molino de rodillos, diseñada y construida para la investigación, con la que se obtiene la separación de las fibras. Con este proceso se obtienen fibras con una longitud promedio de 9 cm.

Propiedades físicas y mecánicas

Como se explicó anteriormente, las propiedades de las fibras naturales están fuertemente influenciadas por su composición química. Sin embargo, factores como los defectos, los procesos de extracción, el grado de cristalinidad, y el contenido de humedad, entre otros, afectan su desempeño [33]. La Tabla 3 presenta algunas propiedades físicas y mecánicas de varias fibras naturales.

Fibra	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación en la falla (%)	Densidad (g/cm ³)
Algodón	287-800	5,5-12,6	8 %	34
Coco	175	4,6	3,0	1,2
Bambú	140-230	11-17	-	0,6-1,1
Fique	43-571	8,2-9,1	9,8	0,72
Lino	345-1100	27,6	2,7-3,2	1,5
Guadua <i>angustifolia</i>	350 ± 50	26,1 ± 9,2	1,7 ± 0,5	1,4 ± 0,2

TABLA 3. *Propiedades de algunas fibras naturales [13, 19, 27, 34].*

El comportamiento mecánico de las fibras naturales es predominantemente frágil, con una relación lineal entre esfuerzos y deformaciones hasta la falla súbita de la fibra [27, 35]. Además, es evidente que existe una alta variabilidad en la determinación de sus propiedades.

Tratamientos de compatibilización para ser usadas como refuerzo en matrices poliméricas

Algunas de las desventajas de emplear fibras naturales como refuerzo de matrices poliméricas son la alta variabilidad de sus propiedades, la absorción de agua, la baja resistencia y la durabilidad, entre otras. Sin embargo, el principal inconveniente es la baja compatibilidad que existe entre las fibras y las matrices poliméricas comúnmente empleadas. Esta incompatibilidad es consecuencia del comportamiento hidrofílico de las fibras e hidrófobo de los polímeros [15, 36-38], lo que produce una transferencia deficiente de esfuerzos desde la matriz hacia las fibras, dando como resultado bajas resistencias mecánicas del material compuesto conformado.

Mecánicamente, es la región de la interfase la directamente encargada del proceso de transferencia de esfuerzos entre los constituyentes del material compuesto y, por tanto, las propiedades de esta juegan un papel preponderante en el desempeño mecánico [2]. De acuerdo con Hull *et al.* [39], las propiedades de la región interfacial son consecuencia de la adherencia entre fibras y matriz, las cuales pueden ser atribuidas a cinco mecanismos, actuando

de manera aislada o en combinada: humectabilidad, interdifusión, atracción electrostática, adherencia química y adherencia mecánica. De esta forma, existen dos métodos para incrementar la adherencia de polímeros reforzados con fibras naturales: el primero enfocado a modificar las propiedades físico-químicas de las fibras y el segundo modificando el polímero [40]. Para aplicaciones industriales, son comúnmente empleadas las metodologías encaminadas a modificar las fibras [29, 41].

En general, la modificación de las propiedades de las fibras se puede realizar a través de procesos químicos o físicos [13, 19]. El propósito de los procesos químicos es reducir las características hidrofílicas de las fibras, a través de su inmersión en diferentes soluciones que reaccionen con los grupos hidroxilo presentes en la hemicelulosa y la lignina [42, 43], induciendo así una mayor compatibilidad química con los polímeros [7]. De esta forma se emplean tratamientos con soluciones alcalinas, acetilación y benzoilación, entre muchas otras [9]; sin embargo, los tratamientos alcalinos y, dentro de estos, los que emplean soluciones de hidróxido de sodio (NaOH), son los más empleados [19]. Por otra parte, las modificaciones realizadas por procesos físicos están enfocadas en transformar las propiedades superficiales de las fibras, incrementando principalmente la adherencia mecánica con los polímeros [9, 24]. Algunas de las técnicas empleadas dentro de los procesos físicos son los tratamientos plasma, la irradiación ultravioleta y corona, entre otros [43].

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de los tratamientos alcalinos con NaOH es eliminar la hemicelulosa y la lignina presente en la fibra, reduciendo así su comportamiento hidrofílico. Además, el NaOH puede reaccionar con grupos hidroxilo presentes en la región amorfa de la celulosa, exponiendo la celulosa cristalina para que reaccione con la matriz empleada [18, 44]. Si para el tratamiento se emplean concentraciones de NaOH altas (mayores al 10 %) o se hacen por tiempos prolongados (mayores a 1 h), se puede generar una deslignificación excesiva de la fibra, que trae como consecuencia una disminución en su desempeño mecánico [29, 45–47].

En ciencia de materiales, los tratamientos plasma han sido empleados desde 1960 [48]. El plasma es considerado el cuarto estado de la materia y consiste en la ionización de un gas (son generados aplicando descargas eléctricas a un gas) o calentándolo a altas temperaturas; sin embargo, en el procesamiento de materiales son comunes los plasmas generados a partir de descargas eléctricas [49]. Los plasmas calientes se caracterizan por tener altas temperaturas dentro del gas ionizado (desde 4000K a 20000K), mientras que en los plasmas fríos los electrones tienen mayor temperatura que los iones positivos [50, 51]. Los plasmas fríos son comúnmente empleados para el tratamiento de materiales [52].

En general, los plasmas fríos se usan para tres propósitos: funcionalización de superficies, depositación de láminas delgadas y grabado [48, 49, 53]. Aunque las alteraciones que los plasmas fríos generan en las superficies de los materiales son complejas, varias investigaciones reportan que no modifican las propiedades macroscópicas del material tratado [9, 27, 54–56], pues las especies del plasma no penetran más allá de $100 \times 10^{-10}\text{m}$ (100 Å) de la superficie [57].

Los procesos de grabado están enfocados en la remoción de material de la superficie [51], lo cual puede ser realizado usando procesos químicos, llamados grabados húmedos, o procesos físicos o físico-químicos, llamados grabados en seco. Los procesos de grabado en seco pueden realizarse a través de pulverización física (*physical sputtering*) reacciones químicas o mecanismos asistidos por iones. En la pulverización física, el material es removido por procesos puramente físicos.

Luna *et al.* [27] realizó modificaciones en fibras de guadua empleando tratamientos con soluciones de hidróxido de sodio (proceso químico) y con plasma de grabado en seco (proceso físico). Los resultados muestran que el tratamiento químico reduce la cantidad de hemicelulosa y lignina, que trae como consecuencia una disminución en la resistencia a tensión y en la capacidad de absorción de agua de las fibras. En el primer caso, la disminución de la resistencia se atribuye a una afectación en la transferencia

de esfuerzos entre las microfibrillas y, en el segundo caso, a que los grupos OH presentes en estos componentes son los que controlan en gran medida las características hidrofílicas de las fibras. Además, los análisis morfológicos usando micrografías SEM (microscopio electrónico de barrido, por sus siglas en inglés) muestran que este tratamiento tiene un efecto de “limpieza” en la superficie de las fibras. Por otra parte, los tratamientos con plasma de grabado en seco no alteran la resistencia mecánica ni la capacidad de absorción de agua e incrementan la rugosidad superficial de las fibras tratadas.

Conclusiones

Se presentó una revisión sobre aspectos técnicos relevantes para el uso de fibras naturales como refuerzo de matrices poliméricas. Las fibras incluidas en esta revisión constituyen a las obtenidas de plantas, que presentan comportamientos hidrofílicos que las hacen incompatibles con los polímeros. Es así que para su empleo es necesario realizar algunos tratamientos direccionalados a aumentar la adherencia entre las fases del compuesto. Además, esta revisión incluye algunos de los hallazgos realizados en la investigación realizada por Luna *et al.* [27], la cual estuvo enfocada a proporcionar aspectos técnicos y científicos del uso de fibras de bambú Guadua *angustifolia* como refuerzo de matrices poliméricas. Se espera que en un futuro cercano las fibras naturales se conviertan en recursos sostenibles y renovables ampliamente usados en la industria de materiales compuestos y contribuyan a alcanzar los logros de los beneficios dentro de una economía circular.

References

- [1] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed. (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011) pp. 461–477.
- [2] M. A. Meyers and K. K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials* (Cambridge University Press, 2008).
- [3] M. D. Isaac and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed. (Oxford University Press, 2006).

- [4] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, sexta ed. (Cengage Learning Editores, S.A., 2013) p. 892.
- [5] J. Liu, M. Jiang, Y. Wang, G. Wu, and Z. Wu, Ceram. Int. **39**, 9173 (2013).
- [6] K. Senthilkumar, N. Saba, and et al., Contr. Build. Mater. **195**, 423 (2019).
- [7] K. L. Pickering, M. G. Aruan-Efendy, and T. M. Le, Compos. - A: Appl. Sci. Manuf. **83**, 98 (2015).
- [8] C. E. Njoku, K. K. Alaneme, J. A. Omotoyinbo, and M. O. Daramola, Adv. Mat. Lett. **10**, 682 (2019).
- [9] J. A. Halip, L. S. Hua, and et al., *Effect of treatment on water absorption behavior of natural fiber-reinforced polymer composites* (Woodhead Publishing, 2019) pp. 141–156.
- [10] S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and S. Arora, Compos. - A: Appl. Sci. Manuf. **35**, 371 (2004).
- [11] V. Shanmugam, R. A. Mensah, and et al., JCOMC **5** (2021).
- [12] P. Peças, H. Carvalho, H. Salman, and M. Leite, J. Compos. Sci. , 1 (2018).
- [13] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, Prog. Polym. Sci. **37**, 1552 (2012).
- [14] M. Jawaaid and H. P. S. Abdul Khalil, Carbohyd. Polym. **86**, 1 (2011).
- [15] K. Rohit and S. Dixit, Polym. Renew. Resour. **7**, 43 (2016).
- [16] S. M. Rangappa, S. Siengchin, and et al., Polym. Compos. **43**, 645 (2022).
- [17] T. P. Sathishkumar, P. Navaneethakrishnan, and et al., J. Reinf. Plast. Compos. **32**, 1457 (2013).
- [18] M. J. John and R. D. Anandjiwala, Polym. Compos. **29**, 187 (2007).
- [19] P. H. Fernandes, M. de Freitas, and et al., Polímeros **25**, 9 (2015).
- [20] M. Hughes, J. Mater. Sci. **47**, 599 (2012).
- [21] M. Fuqua, S. Huo, and C. Ulven, Polym. Rev. **52**, 259 (2012).

- [22] A. Ali, K. Shaker, Y. Nawab, M. Jabbar, T. Hussain, J. Militky, and V. Baheti, *J. Ind. Text.* **47**, 1 (2016).
- [23] R. Fangueiro and S. Rana, *Natural Fibres: advances in science and technology towards industrial applications*, Vol. 12 (Springer, 2016) pp. 343–350.
- [24] A. K. Bledzki, S. Reihmane, and J. Gassan, *J. Appl. Polym. Sci.* **59**, 1329 (1996).
- [25] Z. Azwa, B. Yousif, A. Manalo, and W. Karunasena, *Mater. Des.* **47**, 424 (2013).
- [26] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, *Compos. B. Eng.* **53**, 362 (2013).
- [27] P. Luna, *Mechanical behavior of a composite material using a polyester matrix reinforced with Guadua angustifolia bamboo fibers*, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de Colombia (2020).
- [28] M. Estrada, *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*, Ph.D. thesis, Universidad de Los Andes (2010).
- [29] P. Luna and J. L. Marriaga, *An extraction methodology of Guadua angustifolia bamboo fibers* (6th Amazon and Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference, 2016).
- [30] S. Subash, S. T. Retnam, and E. Raja, *IJACSA* **5**, 22 (2017).
- [31] P. Zakikhani, R. Zahari, M. T. H. Sultan, and D. L. Majid, *Mater. Des.* **63**, 820 (2014).
- [32] R. Acosta, J. A. Montoya, and J. Welling, *BioResources* **16**, 3214 (2021).
- [33] F. A. Silva, N. Chawla, and R. D. T. Filho, *Compos. Sci. Technol.* **68**, 3438 (2008).
- [34] S. Delvasto, E. F. Toro, F. Perdomo, and R. M. de Gutiérrez, *Constr. Build. Mater.* **24**, 187 (2010).
- [35] L. Osorio, E. Trujillo, and et al., *J. Reinf. Plast. Compos.* **30**, 396 (2011).
- [36] Y. G. T. Girijappa, S. M. Rangappa, and et al., *Front. Mater.* **6** (2019).

- [37] T. Alsaeed, B. F. Yousif, and H. Ku, Mater. Des. **43**, 177 (2013).
- [38] M. Y. Hashim, A. M. Amin, and et al., J. Phys.: Conf. Ser. **914**, 012030 (2017).
- [39] D. Hull and T. Clyne, *An introduction to composite materials*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 1996).
- [40] A. Valadez-Gonzalez, J. M. Cervantes, R. Olayo, and P. J. Herrera-Franco, Compos. B: Eng. **30**, 309 (1999).
- [41] J. Summerscales, N. P. J. Dissanayake, A. S. Virk, and W. Hall, Compos. - A: Appl. Sci. Manuf. **41**, 1329 (2010).
- [42] J. George, M. Sreekala, and S. Thomas, Polym. Eng. Sci. **41**, 1471 (2001).
- [43] M. R. Sanjay, S. Siengchin, and et al., Carbohyd. Polym. **207**, 108 (2019).
- [44] D. Lui, J. Song, and et al., Cellulose **19**, 1449 (2012).
- [45] X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, J. Polym. Environ. **15**, 25 (2007).
- [46] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, Composites Part B: Engineering **43**, 2883 (2012).
- [47] R. Punyamurthy, D. Sampathkumar, and et al., BioResources **7**, 3515 (2012).
- [48] R. Li, L. Ye, and Y. Y. Mai, Compos. - A: Appl. Sci. Manuf. **28**, 73 (1997).
- [49] J. M. Albella, *Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones* (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003).
- [50] M. J. Shenton and G. C. Stevens, J. Phys. D: Appl. Phys. **34**, 2761 (2001).
- [51] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, and J. V. D. Mullen, Spectrochim. Acta B: At. Spectrosc. **57**, 609 (2002).
- [52] S. K. Nema and P. B. Jhala, *Plasma technologies for textile and apparel* (Woodhead Publishing India Pvt. Ltd., 2015).
- [53] F. S. Denes and S. Manolache, Prog. Polym. Sci. **29**, 815 (2004).
- [54] T. H. C. Costa, M. Feitor, and et al., Matéria **13**, 65 (2008).

- [55] M. O. Cardoso Macêdo, H. R. Alves de Macêdo, and et al., Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde **1**, 1 (2011).
- [56] B. Barra, S. Santos, and et al., Ind. Crops. Prod. **77**, 691 (2015).
- [57] Z. Q. Hua, R. Sitaru, and et al., Plasmas and Polymers **2**, 199 (1997).