Artículo Científico / Scientific Paper

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR
INGENIUS
Revista de Ciencia y Tecnología
https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.10
pISSN: 1390-650X / eISSN: 1390-860X

Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D

Mechanical Flexural Characterization of Composite Materials with Photopolymer Matrix Reinforced with Abaca and Cabuya Fibers Using 3D Printing

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño[1,*], Diana Peralta-Zurita[1], Marco Pucha-Tambo[1], Juan Carlos Rocha-Hoyos[1,*]

Resumen

Los materiales compuestos y la fabricación por impresión 3D son en la actualidad una alternativa en la fabricación de autopartes. La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar el material compuesto con matriz de resina fotopolimérica reforzada con fibras naturales de abacá y cabuya fabricados por impresión 3D, para su aplicación en la fabricación de autopartes. Como objeto de estudio se seleccionó la rejilla direccional del ducto de aire acondicionado de un automotor; mediante análisis experimental y simulación computacional se compararon sus características mecánicas. Para la fabricación de las probetas de ensayos se propuso una fracción volumétrica de fibra refuerzo del composite del 20 % en los dos tipos de fibras, el ensayo a flexión se procedió según la norma ASTM 790.

Abstract

Composite materials and the manufacture of auto parts by 3D printing, is currently an alternative in the manufacture of automotive auto parts. The objective of the present investigation was to characterize the composite material with a photopolymer resin matrix reinforced with natural abaca and cabuya fibers manufactured by 3D printing, for its application in automotive autoparts manufacturing. As an object of study, the directional grid of the air conditioning duct of an automotive vehicle is selected, which by means of an experimental analysis and computational simulation, compares its mechanical characteristics; For the manufacture of the test specimens, a composite volumetric reinforcement fiber fraction of 20% was proposed in the two types of fibers, the bending test was carried out according to the ASTM 790 standard.

[1,*]Grupo de Investigación en Innovación en el diseño de procesos y productos en el Ecuador, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Carrera de Mecánica, Universidad Internacional SEK, Quito – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: antonio.llanes@uisek.edu.ec, carlos.rocha@uisek.edu.ec.
http://orcid.org/0000-0001-6739-7661, http://orcid.org/0000-0002-9523-0743,
http://orcid.org/0000-0001-6739-7661, http://orcid.org/0000-0003-0660-7199.

Recibido: 14-05-2019, aprobado tras revisión: 25-06-2019

Forma sugerida de citación: Llanes-Cedeño, E. A.; Peralta-Zurita, D.; Pucha-Tambo, M. y Rocha-Hoyos, J. C. (2019). «Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D». Ingenius. N.° 22, (julio-diciembre). pp. 100-112. doi: https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.10.

Como resultado de la caracterización mecánica de los materiales fabricados se obtuvo que el esfuerzo máximo a flexión de los compuestos reforzados con abacá (77,53 MPa) y cabuya (83,26 MPa) disminuyeron con respecto al material matriz (92,77 MPa). El módulo de elasticidad a la flexión que presentaron compuestos reforzados con abacá (2211,33 MPa) y cabuya (1806,03 MPa) aumentaron con respecto al material matriz (1689,64 MPa), lo que se traduce en un aumento de la rigidez de los materiales caracterizados, haciendo posible la sustitución del material matriz.

Palabras clave: materiales compuestos, impresión 3D, fibras de abacá, fibras de cabuya, matriz fotopolimérica.

As a result of the mechanical characterization of the manufactured materials it was obtained that the maximum bending stress of the compounds reinforced with abaca (77,53 MPa) and cabuya (83,26 MPa) decreased with respect to the matrix material (92,77 MPa), the modulus of elasticity to flexion that had reinforced compounds with abaca (2211,33 MPa) and cabuya (1806,03 MPa) increased with respect to the matrix material (1689,64 MPa), which translates into an increase in the rigidity of the characterized materials, making possible the substitution of the matrix material.

Keywords: composite materials, 3D printing, abaca fibers, cabuya fibers, photopolymer matrix.

1. Introducción

Las fibras naturales como refuerzo de polímeros se usan en distintos lugares del mundo para la fabricación de autopartes debido a sus características de peso ligero, bajo costo y buenas propiedades mecánicas, atribuyendo la capacidad de fácil reciclaje y la reducción en desperdicios, como también la reducción de emisiones contaminantes gracias al alivianamiento en el peso del vehículo generando ahorro de combustible, contribuyéndose a las políticas ambientales a nivel mundial [1, 2].

Faruk *et al.* [3] afirman que en los últimos años la industria automotriz se ha centrado en la elaboración y utilización de materiales compuestos, integrando fibras naturales como un elemento de refuerzo, para la fabricación de autopartes externas e internas del vehículo, contribuyendo al medioambiente al utilizar en forma adecuada las fibras naturales con mejores propiedades mecánicas para su aplicación en la fabricación. En el año 2015, Ahmad *et al.* [4] en su estudio analizan el uso y aplicación de fibras naturales: yute, bambú y abacá, como refuerzo para materiales compuestos en la fabricación de autopartes, a partir del análisis de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas. Además, Roshdestwensky *et al.* [5] destacan que estos nuevos materiales se afirman y consolidan en las áreas aeroespacial, naval... favoreciendo su aplicación en el sector manufacturero, en particular el automotor; empleando las fibras naturales como reemplazo de las fibras sintéticas presentes en el vehículo, reduciéndose el peso del automóvil y su costo.

Guo y Leu [6] estudian los compuestos de polímeros reforzados con fibra natural en aplicaciones industriales evaluando la viabilidad de fibras de palma datilera para la industria automotriz, logrando una mejora en los paneles de las puertas de la Clase E de Mercedes-Benz en cuanto a propiedades mecánicas del material original, esto se logró al utilizar resina epóxica como material matriz e incrustando fibras de lino/sisal, reduciendo el 20 % del peso original.

Li y Huang [7] investigaron sobre la aplicación de tecnología para el prototipado rápido en la fabricación de partes de automóviles, aplicando tecnología de impresión 3D, con diferentes métodos como: estereolitografía (SLA), modelado por deposición fundida (FDM), sinterización selectiva por láser (SLS). Se consiguió reducir los tiempos de fabricación, incluso en elementos que presentan complejidad geométrica para su desarrollo; esto permitió a las empresas manufactureras reducir tiempos de producción y costos, obteniendo ganancias económicas significativas en la producción en serie.

Berchon y Luyt [8] afirman que la tecnología de impresión 3D, trae beneficios como: reducción en tiempos de fabricación, obtención de geometrías de elementos de gran complejidad, reducción de las cadenas o estaciones de producción, ahorro del material utilizado y disminución de residuos luego del proceso de manufactura, comparados con los métodos de producción convencionales.

Bonada, Muguruza y Ramis [9] afirman que la fabricación aditiva puede generar partes o elementos en 3D, agregando material capa a capa fabricando geometrías complejas sin usar herramientas o accesorios específicos. La tecnología PolyJet es un método de impresión 3D que ofrece un acabado superficial de mejor calidad comparado con los otros métodos de manufactura aditiva, con una gran variedad de materiales para las diferentes industrias y aplicaciones solicitadas [10].

Callister [11] menciona que las propiedades finales de los materiales compuestos dependen de las características de los dos componentes principales: la matriz, la interfaz, y el refuerzo, tomando en cuenta en este último la forma, tamaño, distribución y orientación, además, plantea que una de las principales combinaciones de materiales compuestos son aquellos reforzados con fibras, que presentan excelentes propiedades mecánicas: resistencia a la tracción y elevado módulo específico, a partir de elementos bases de baja densidad tanto en la matriz como en la fibra. Además, siendo la orientación, cantidad y distribución del refuerzo del material compuesto directamente influyentes en las propiedades mecánicas finales del compuesto [12], como se muestra en la Figura 1.

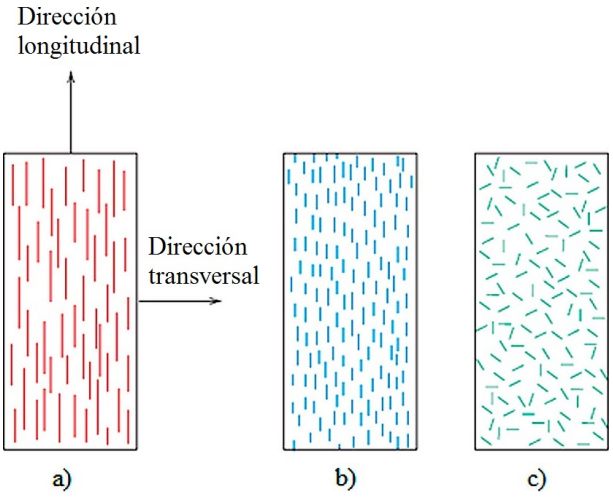

Figura 1. Orientaciones posibles del refuerzo en un material compuesto: a) fibras continuas y alineadas, b) fibras discontinuas y alineadas, y c) fibras discontinuas orientadas aleatoriamente; tomado de [11].

Gracias a la ventaja sobre las técnicas tradicionales de manufactura las muestras fabricadas por impresión 3D demuestran tener mejores propiedades mecánicas que los modelos fundidos, gracias a la correcta adhesión interfacial matriz-fibra de las muestras impresas [13].

En los vehículos automotores actuales, para direccionar el flujo del aire acondicionado, se emplean unas

rejillas que se regulan manualmente, debido a esto se producen roturas. Reemplazarlas por las originales en ocasiones resulta no viable, por lo que utilizar materiales compuestos y el proceso de fabricación por impresión 3D resulta ser una opción atractiva.

A partir de lo anteriormente explicado el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar el material compuesto con matriz de resina fotopolimérica reforzada con fibras naturales de abacá y cabuya fabricados por impresión 3D, mediante la simulación computacional y ensayos mecánicos, para su aplicación en la fabricación de autopartes.

2. Materiales y métodos

El proceso de obtención de un material compuesto mediante tecnologías de fabricación aditiva para la mejora de las propiedades mecánicas, en función de la fibra refuerzo de abacá y cabuya, con una proporción volumétrica del 20 %, se muestra en la Figura 2.

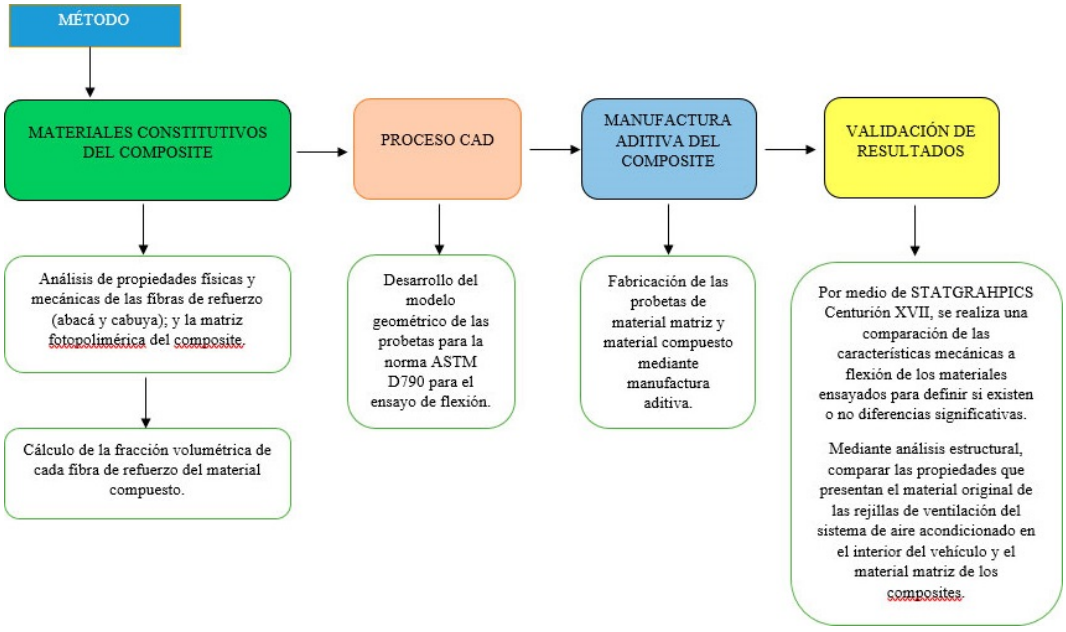

Figura 2. Pasos para la obtención y validación del material compuesto.

Los materiales constitutivos del composite fueron dos tipos de fibras naturales (el abacá y la cabuya como elementos de refuerzos) y un elemento fotopolimérico como matriz para la fabricación del compuesto.

2.1. Cálculo de la densidad de fibra de abacá y de la cabuya

Se emplea el procedimiento realizado por [13], el cual determina la densidad de la fibra de piña a partir de la determinación de la densidad de la resina por medio de construcción de probetas y luego la construcción de probetas con material compuesto. Determinándose por diferencia la densidad de la fibra.

2.2. Matriz fotopolimérica

El elemento usado como matriz orgánica/polimérica del material compuesto es un fotopolímero usado en fabricación aditiva con tecnología PolyJet (VeroClear RGO8 10) cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del material matriz del composite

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Matriz fotopolimérica	1.181	50-65	75-110	2-3

Para el cálculo de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo (cabuya y abacá respectivamente), se realiza bajo la regla de las mezclas para compuestos reforzados por fibras.

2.3. Regla de las mezclas para compuestos reforzados por fibras

«La regla de las mezclas siempre dará la densidad de los compuestos reforzados con fibra» [14, 15], donde muestra la expresión matemática que permite obtener la densidad del material compuesto, en la que se relaciona las fracciones volumétricas y densidades de la matriz y fibra refuerzo, que se observa en la

Ecuación 1, donde: ρ_c = densidad del material compuesto, f_m = fracción volumétrica de la matriz, ρ_m = densidad de la matriz, f_f = Fracción volumétrica de la fibra y ρ_f = densidad de la fibra.

$$\rho_c = f_m \cdot \rho_m + f_f \cdot \rho_f \quad (1)$$

Tomando en cuenta:

$$f_m = 1 - f_f \quad (2)$$

Para el análisis se propone una fracción volumétrica de fibra refuerzo del composite del 20 % para los dos tipos de fibras de abacá y cabuya respectivamente, a partir de estudios previos donde se referencian los mejores resultados con fracción volumétrica entre un 20 y 23 % de fibra.

2.4. Desarrollo del modelo geométrico de las probetas

Para el desarrollo geométrico de las probetas del material compuesto se aplicó la norma ASTM 790 para el ensayo de flexión con las dimensiones de 153,6 × 13 ×4 mm.

2.5. Fabricación aditiva de las probetas a ensayar

La fabricación aditiva de las probetas a ensayar se la realiza en una impresora 3D, inyectando fotopolímeros sobre una superficie, depositada capa por capa con una resolución de 0,1 mm, aplicándose un tratamiento ultravioleta posterior entre capa, endureciendo la resina; se pausa la impresión y se coloca una capa de fibra al 20 % de fracción volumétrica y se continúa con la impresión, como se presenta en las Figuras 3, 4 y 5.

Figura 3. Fabricación aditiva de probeta de flexión con material base.

Figura 4. Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de abacá.

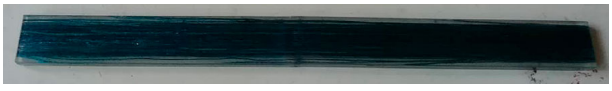

Figura 5. Fabricación aditiva de probeta de flexión del composite reforzado con fibras de cabuya.

2.6. Equipos

1) Máquina universal de ensayos. Realiza ensayos para materiales poliméricos, compuestos y metales ligeros, empleando la máquina de ensayos marca Metrotec, serie MTE 50 con una capacidad de 50 kN.

2) Impresora 3D. Para la fabricación aditiva de todas las probetas, se utiliza la tecnología PolyJet, la cual trabaja con varios materiales de ingeniería, modelo Objet 30 PRO, tecnología PolyJet, con una capacidad de impresión neta de 300 x 200 x 150 mm.

3) Estufa. Se aplica para el secado de las fibras, la misma permite visualizar de forma digital la temperatura.

4) Microscopio electrónico de barrido, marca ASPEX. Es empleado para obtener micrografías de la sección transversal de las probetas ensayadas a flexión, tomando en cuenta las tres configuraciones realizadas entre un rango de detección de 500 nm a 5 mm.

El *software* empleado para la simulación estructural de los materiales es el NX 10, una potente herramienta de simulación a nivel de ingeniería.

Los resultados de los análisis y los gráficos fueron obtenidos a partir del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV (Trial version 15, StatPoint Inc., USA). Para el diseño experimental fue utilizado un diseño factorial, en el cual se estudian los efectos de las fibras abacá y cabuya en las propiedades mecánicas de materiales compuestos con matriz fotopolimérica.

3. Resultados y discusión

La densidad promedio obtenida para la fibra de abacá es de 1,226 g/cm^3 y para la cabuya de 0,665 g/cm^3. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del material base y el material compuesto reforzado con los dos tipos de fibras de abacá y cabuya respectivamente.

3.1. Resultados del ensayo a flexión del material matriz

Se realizó la manufactura aditiva de cinco probetas para ensayos a flexión bajo la norma ASTM 790 del material matriz, con la finalidad de tener valores referenciales. En la Figura 6 se muestran las probetas en las cuales se identifica que se generó fractura posterior al ser ensayadas.

En la Tabla 2 se muestran los valores del ensayo a flexión realizadas a cinco probetas de material matriz del composite. Identificando valores promedios del esfuerzo máximo de flexión de 92,77 MPa con una

desviación estándar 9,67, Módulo de elasticidad secante a flexión de 1689,64 MPa con desviación estándar de 216,59 y una deflexión de 8,72 mm con desviación estándar de 0,96.

Figura 6. Probetas ensayadas del material matriz.

Tabla 2. Resultados de ensayo de flexión de material matriz

Material	Recuento	Promedio	Desviación estándar
Fuerza máxima (N)	5	189,33	19,58
Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	5	92,77	9,67
Módulo de elasticidad secante a flexión (MPa)	5	1689,64	216,59
Deformación máxima (%)	5	5,13	0,61
Deflexión (mm)	5	8,71	0,96

Nota. Las probetas de flexión del material matriz del composite fabricadas con impresión 3D y tecnología PolyJet.

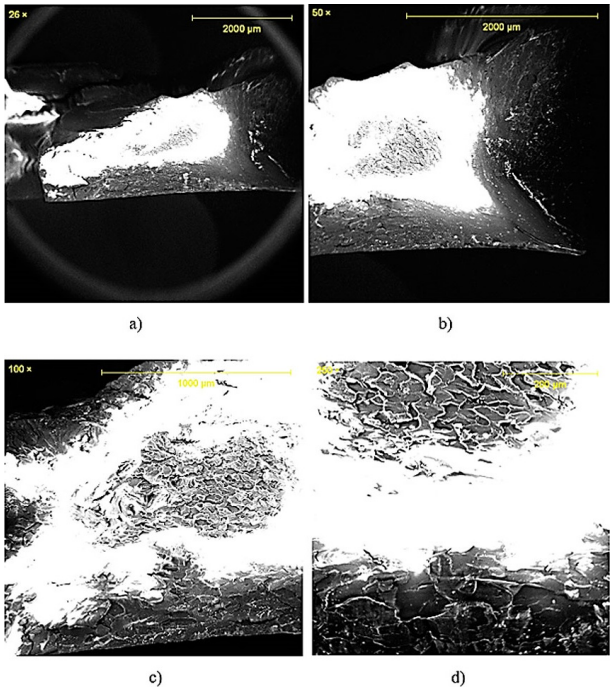

Figura 7. Resina fotopolimérica, material matriz de los materiales compuestos. a) 26X, b) 50X, c) 100X y d) 250X.

Figura 8. Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de abacá.

3.2. Microscopía electrónica de barrido del material matriz

En la Figura 7 se muestran las micrografías de la sección transversal de la resina fotopolimérica, material matriz de los materiales compuestos.

Las micrografías mostradas se realizaron a una de las probetas posterior al ensayo de flexión, a diferente alcance con la finalidad de constatar si la probeta presenta grietas internas entre sus capas impresas. La micrografía realizada con un alcance de 250X permite verificar que la muestra ensayada es homogénea y no presenta fisuras internas, consolidando los valores de las propiedades mecánicas del material matriz obtenidas luego del ensayo a flexión.

Se realizó la manufactura aditiva de cinco probetas para ensayos a flexión bajo la norma ASTM 790 del composite reforzado con fibras de abacá; en la Figura 8 se muestran las probetas luego de ser ensayadas. Se observó una rotura parcial del material matriz en la zona ensayada.

Tabla 3. Ensayo de flexión del material compuesto reforzado con fibra de abacá

Material	Recuento	Promedio	Desviación estándar
Fuerza máxima (N)	5	153,99	20,73
Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	5	77,53	11,88
Módulo de elasticidad secante a flexión (MPa)	5	2211,33	225,41
Deformación máxima (%)	5	3,25	0,50
Deflexión (mm)	5	5,60	0,89

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del ensayo a flexión del material compuesto reforzado con el 20 % de fibra de abacá bajo la norma ASTM 790, fabricado por impresión 3D y tecnología PolyJet.

Se identificaron valores promedios del primer material compuesto reforzado con fibra de abacá: esfuerzo máximo de flexión 77,53 MPa, módulo de elasticidad secante a la flexión 2211,33 MPa y deflexión de 5,60 mm.

3.3. Microscopía electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de abacá

En la Figura 9 se muestra una microscopía electrónica de barrido realizada a una de las probetas ensayadas en el área de la fractura posterior al ensayo a flexión.

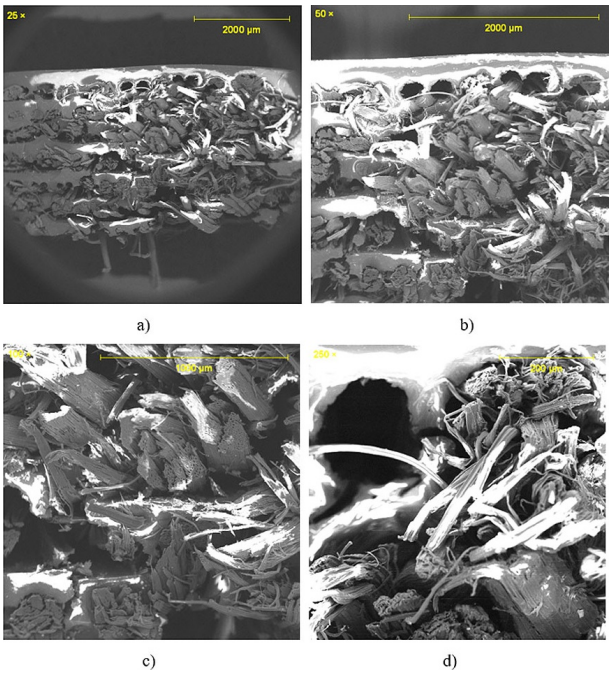

Figura 9. Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de abacá.

Las micrografías se realizaron a una de las probetas de material compuesto posterior al ensayo de flexión a diferente alcance. La micrografía hecha con un alcance de 250X muestra la pobre adherencia entre fibras de refuerzo y material matriz de resina fotopolimérica, es decir, no existe una buena interfaz en el material compuesto.

Se realizó la manufactura aditiva de cinco probetas para ensayos de flexión bajo la norma ASTM 790 del composite reforzado con fibras de cabuya. En la Figura 10 se muestran las probetas luego de ser ensayadas. En donde las probetas no sufrieron rotura en su totalidad se puede identificar que solo se generó una fractura parcial del material matriz en la zona ensayada.

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de flexión del material compuesto reforzado con el 20 % de fibra de cabuya bajo la norma ASTM 790. Se hallaron valores promedios del segundo material compuesto reforzado con fibra de cabuya: esfuerzo máximo de flexión de 83,26 MPa, módulo de elasticidad secante a la flexión de 1806,03 MPa y una deflexión de 7,93 mm.

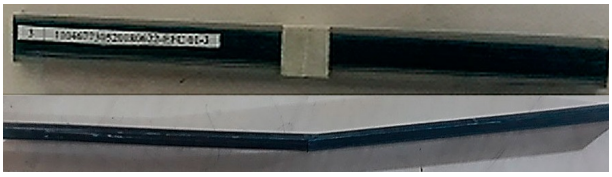

Figura 10. Probetas ensayadas del composite reforzadas con fibra de cabuya.

Tabla 4. Ensayo de flexión del material compuesto reforzado con fibra de cabuya

Material	Recuento	Promedio	Desviación estándar
Fuerza máxima (N)	5	185,86	13,54
Esfuerzo máximo de flexión (MPa)	5	83,25	6,48
Módulo de elasticidad secante a flexión (MPa)	5	1806,03	220,52
Deformación máxima (%)	5	4,67	0,74
Deflexión (mm)	5	7,93	1,27

Nota. LLas probetas de flexión del composite se fabricaron mediante impresión 3D con tecnología PolyJet.

3.4. Microscopía electrónica de barrido del composite reforzado con fibra de cabuya

En la Figura 11 se muestra una microscopía electrónica de barrido realizada a una de las probetas ensayadas en el área de la fractura posterior al ensayo de flexión.

Las micrografías mostradas se realizaron a una de las probetas de material compuesto posterior al ensayo a flexión, a diferente alcance con la finalidad de constatar si existe una buena interfaz entre la matriz polimérica y la fibra natural de cabuya. La micrografía obtenida con un alcance de 250X nos permite verificar que existe una pobre adherencia entre las fibras de refuerzo y el material matriz de resina fotopolimérica, es decir, no existe una buena interfaz en el material compuesto.

Se debe considerar que no existe un estudio previo en este campo, por lo que los resultados arrojados por la microscopía electrónica de barrido que muestran una deficiente adherencia entre las fibras y el material matriz, es un referente para trabajos posteriores.

Figura 11. Material compuesto reforzado con fibra de cabuya. a) 28X, b) 50X, c) 100X y d) 250X.

3.5. Resultados de la simulación estructural de las rejillas de aire acondicionado como aplicación

La simulación estructural se realiza con la ayuda del *software* NX 10 de Siemens con la finalidad de poder observar los valores de desplazamiento nodal y esfuerzo elemental que presenta tanto el material original de los ductos de aire como el material matriz de los materiales compuestos.

1) Rejillas de aire acondicionado de polipropileno. En la Figura 12 se observa los valores correspondientes al desplazamiento nodal máximo que se genera en las rejillas de aire acondicionado con un valor promedio de 0,026 mm.

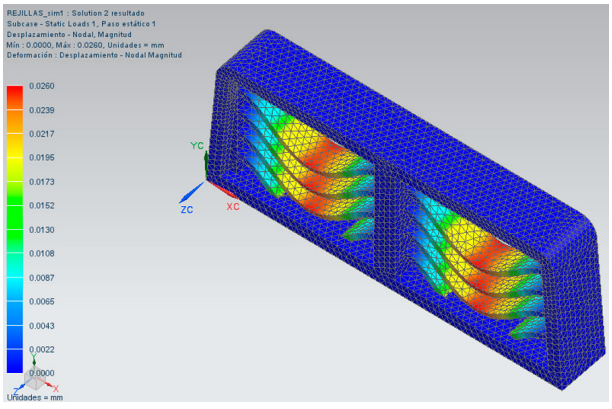

Figura 12. Gráfica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado.

En la Figura 13 se puede verificar los valores máximos de esfuerzos que se generan en las rejillas de aire acondicionado, bajo el análisis o criterio de falla de Von Mises dando un valor de 0,204 MPa como esfuerzo máximo.

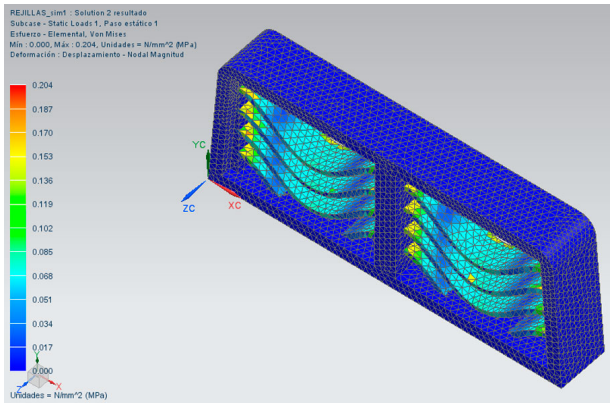

Figura 13. Gráfica de esfuerzos generados en las rejillas de aire acondicionado.

2) Rejillas de aire acondicionado del material matriz de los composites. En la Figura 14 se puede observar los valores correspondientes al desplazamiento nodal máximo que se genera en las rejillas de aire acondicionado dando un valor promedio de 0,048 mm.

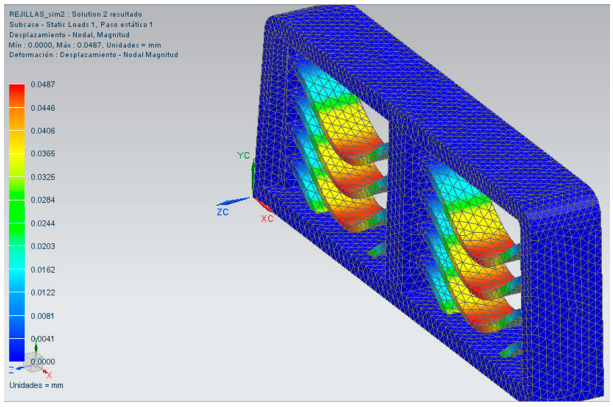

Figura 14. Gráfica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado.

En la Figura 15 se observa valores máximos de esfuerzos que se generan en las rejillas de aire acondicionado, bajo el análisis o criterio de falla de Von Mises dando un valor de 0,21 MPa como esfuerzo máximo.

En los dos tipos de análisis estructural, se aplicó una fuerza promedio de 5 N como carga sobre el elemento, dicho valor fue calculado idealizando una rejilla como una viga soportada sobre dos apoyos y colocado una masa (0,49 kg) que al multiplicar por el valor de la gravedad (9,81 m/s^2) genera un valor promedio de 5 N.

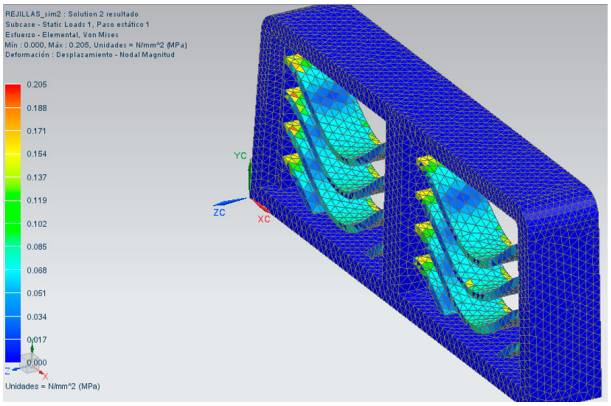

Figura 15. Gráfica de desplazamiento nodal de rejillas de aire acondicionado.

Para la valoración de las propiedades mecánicas obtenidas de los materiales compuestos y el material matriz ensayados, se utilizó el programa Statgraphics Centurión XVII. Se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) y el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para discriminar entre las medias de las variables estudiadas y realizar las comparaciones múltiples [16]. La Tabla 5 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias de esfuerzo máximo de flexión son significativamente diferentes de otras entre los materiales fabricados.

Tabla 5. Método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95 % de confianza.

Material	Casos	Media	Grupos homogéneos
Material matriz (1)	5	92,77	X
Compuesto reforzado con cabuya (2)	5	83,25	X
Compuesto reforzado con abacá (3)	5	77,53	XX

Nota. Se designó a cada material con un número identificativo dentro del análisis.

Se puede observar que entre los materiales (1) y (2) existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza, el material (3) no posee diferencia significativa con los otros dos. Esto se muestra de forma gráfica en la Figura 16.

Pontón y Guerrero [12] obtuvieron un esfuerzo máximo a flexión de un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra longitudinal de abacá mediante estratificación manual con una fracción volumétrica del 20 %, incrementada con respecto al material matriz utilizado; caso contrario sucedió en el presente estudio, ya que el valor obtenido del esfuerzo máximo de flexión del material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá en una fracción volumétrica del 20 % fabricado mediante impresión 3D tuvo una disminución con respecto al material matriz, aunque estadísticamente no es significativo.

En el estudio del material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra de abacá antes mencionado, se realizó un premojado de las fibras con resina poliéster diluida con estireno al 10 % v/v y el sistema catalítico constituido por octoato de cobalto y MEKP en concentraciones del 0,5 y 0,75 %, lo que favoreció la adhesión de las fibras de refuerzo en la matriz de dicho material compuesto [12].

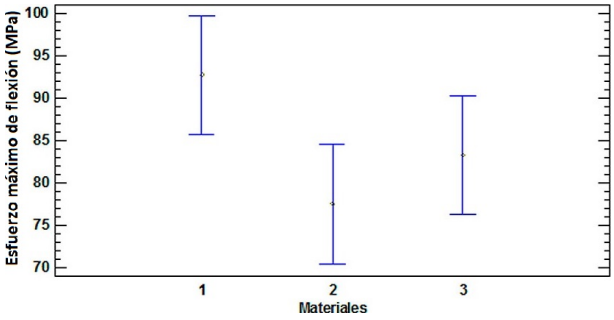

Figura 16. Comparación de medias con el 95 % por la prueba LSD.

El estudio realizado por [15] establece el esfuerzo máximo de flexión de un material compuesto de matriz de poliéster reforzado con fibra longitudinal de cabuya mediante estratificación manual con una fracción volumétrica del 23 %, el cual tuvo una disminución con respecto al material matriz, esto coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el esfuerzo máximo de flexión del material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya en una fracción volumétrica del 20 % fabricado mediante impresión 3D, disminuye con respecto al material matriz.

La disminución de esta propiedad mecánica de los materiales compuestos con respecto al material matriz está relacionada directamente con una pobre interfaz entre el material matriz y la fibra refuerzo mostrado en la microscopía electrónica de barrido.

En la Tabla 6 se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias del módulo de elasticidad secante a flexión poseen diferencias significativas entre los materiales objetos de estudio. Se observa que los materiales (1) y (3) presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza con respecto al material (2).

En la Figura 17 se muestra de forma gráfica la comparación de las medias del módulo de elasticidad secante a flexión de los materiales estudiados.

Tabla 6. Método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95 % de confianza.

Material	Casos	Media	Grupos homogéneos
Material matriz (1)	5	1689,64	X
Compuesto reforzado con cabuya (3)	5	1806,03	X
Compuesto reforzado con abacá (2)	5	2211,33	X

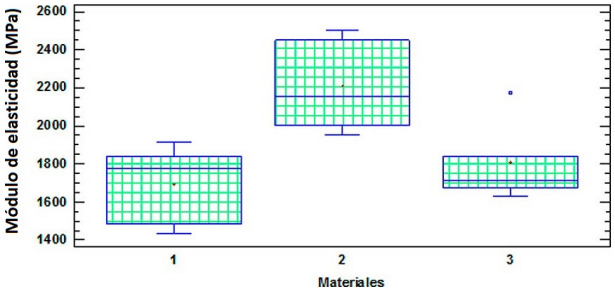

Figura 17. Gráfico caja y bigotes para módulo de elasticidad secante a flexión.

El módulo de elasticidad secante a flexión que presentan los materiales compuestos reforzados con fibra longitudinal de abacá y cabuya respectivamente, incrementó con respecto al material matriz de resina fotopolimérica, como se puede observar en la Figura 18.

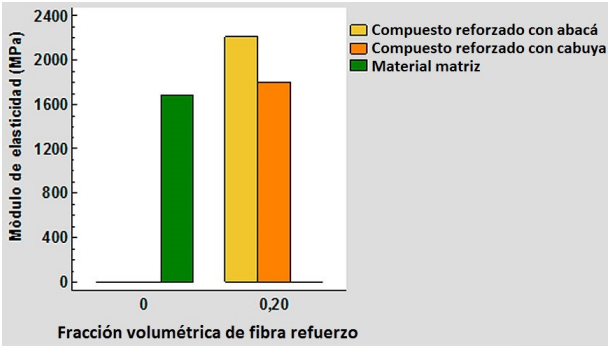

Figura 18. Módulo de elasticidad secante a flexión de los materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo.

El incremento del módulo de elasticidad para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá tuvo un valor del 31 %, mientras que para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya tuvo un valor del 7 %.

Es importante resaltar que en el estudio realizado por [15] el módulo de elasticidad de un material compuesto de matriz polimérica biodegradable reforzado con fibra longitudinal de abacá, mediante moldeo por compresión manual con una fracción volumétrica del 20 % (5570 MPa) aumenta con respecto al material matriz, lo cual es comparable con el resultado obtenido del módulo de elasticidad del material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá en una fracción volumétrica del 20 % fabricado mediante impresión 3D (2211,33 MPa) que de la misma manera tuvo un aumento con respecto al material matriz. Adicionalmente, en el estudio realizado por [17] el módulo de elasticidad aumentó con respecto al material matriz analizado en ese estudio.

En la Figura 19 se muestra en un gráfico de caja y bigotes la comparación de medias para la deflexión mediante el método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher con el 95 % de confianza.

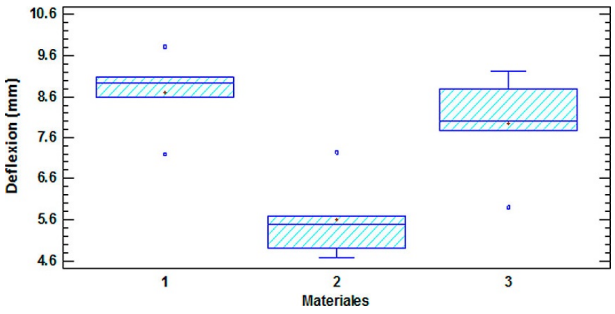

Figura 19. Gráfico caja y bigotes para la deflexión.

Se puede observar que los materiales (1) y (3) presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95 % de confianza con respecto al material (2).

La deflexión que presentan los materiales compuestos reforzados con fibra longitudinal de abacá y cabuya respectivamente, disminuyeron con respecto al material matriz de resina fotopolimérica, como se puede observar en la Figura 20.

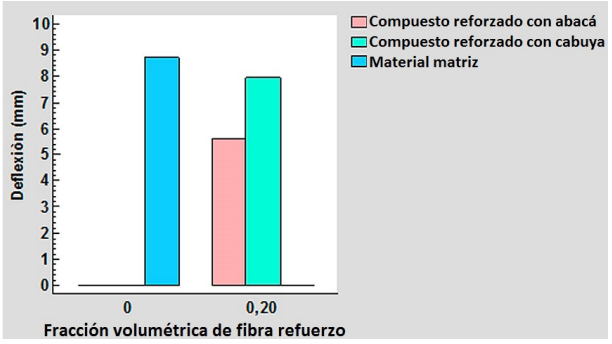

Figura 20. Deflexión de materiales compuestos en función de la fracción volumétrica de la fibra refuerzo.

La disminución de la deflexión para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de abacá tuvo un valor del 36 %, mientras que para el material compuesto reforzado con fibra longitudinal de cabuya tuvo un valor del 9 %.

3.6. Comparación de propiedades mecánicas de flexión de materiales compuestos mediante impresión 3D con otros materiales

En la presente sección se comparan las propiedades mecánicas de flexión obtenidas de la caracterización de materiales compuestos reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D, con otros materiales compuestos reforzados con diferentes fibras naturales y matrices; tomando en cuenta otros procesos de fabricación, como también la comparación con materiales plásticos usados en la industria automotriz. En la Tabla 7 se muestran los valores de esfuerzo máximo de flexión, módulo de elasticidad, tipo de proceso utilizado para la fabricación del material, fracción volumétrica de la fibra refuerzo, tipo de matriz y la orientación de la fibra refuerzo.

Tabla 7. Método de las diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher, con el 95 % de confianza.

Designación del material	Tipo de material	Material Matriz	Fibra refuerzo	Tipo de fabricación	Fracción volumétrica de refuerzo	Orientación de la fibra refuerzo	Esfuerzo Máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad a la flexión (MPa)
MCFI20%AL	*Material compuesto*	*Fotopolímero*	*Abacá*	*Impresión 3D*	*20%*	*Longitudinal*	*77,534*	*2211,33*
MCFI20%CL	*Material compuesto*	*Fotopolímero*	*Cabuya*	*Impresión 3D*	*20%*	*Longitudinal*	*83,256*	*1806,03*
MCPE20%AL	Material compuesto	Poliéster	Abacá	Estratificación manual	20%	Longitudinal	100	10000
MCPE23%CL	Material compuesto	Poliéster	Cabuya	Estratificación manual	23%	Longitudinal	51,39	2355,58
POLIÉSTER	-	Poliéster	-	-	-	-	56,62	1867,82
MCPB20%AL	Material compuesto	Polimérica biodegradable	Abacá	Por compresión	20%	Longitudinal	104,4	5570
PLA	-	Polimérica biodegradable	-	-	-	-	69	2755
MCP20%AT	Material compuesto	Poliéster	Abacá	-	20%	Tejido	62,4	3976

Nota. Se designó a cada material un código en función de los tipos de material, material matriz, fibra refuerzo, fabricación, fracción volumétrica de la fibra refuerzo y la orientación del refuerzo de los diferentes materiales.

Los datos son presentados a través de un gráfico de dispersión X–Y, tomando como datos para el eje de las Y los valores correspondientes a los esfuerzos máximos de flexión y para el eje de las X los valores correspondientes a los módulos de elasticidad a la flexión de los distintos materiales (ver Figura 21).

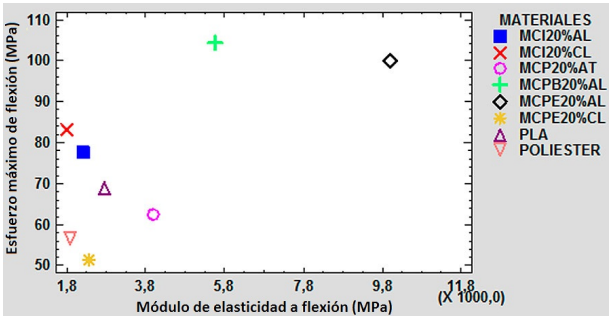

Figura 21. Comparación de las propiedades mecánicas a flexión de distintos materiales.

Los materiales compuestos reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D, presentan mejores características mecánicas de flexión, frente a los materiales compuestos de matriz de poliéster y materiales bases como los polímeros biodegradables y resinas.

De los análisis estructurales mediante simulación hay que mencionar que las rejillas de aire acondicionado de polipropileno tuvieron un desplazamiento nodal de 0,02 mm, mientras que la rejilla de aire acondicionado con el material matriz de los compuestos tuvo un desplazamiento nodal de 0,048 mm, lo que significa la existencia de una diferencia entre los desplazamientos nodales de estos dos materiales simulados.

Los análisis estructurales realizados mediante simulación en las rejillas de aire acondicionado de polipropileno tuvieron un valor de esfuerzo máximo de 0,204 MPa, mientras que la rejilla de aire acondicionado con el material matriz de los compuestos tuvo un esfuerzo máximo de 0,206 MPa, con lo que no existe una diferencia significativa de estos dos materiales simulados.

Tomando en cuenta lo antes mencionado en donde los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá y cabuya respectivamente, el material matriz y el material original de las rejillas de aire acondicionado no presentan grandes diferencias significativas entre sí, se plantea la opción de sustituir al material original con materiales compuestos reforzados con fibras de abacá y cabuya fabricados en el Ecuador.

4. Conclusiones

El esfuerzo máximo de flexión de los materiales compuestos reforzados con fibra de abacá y cabuya en

una fracción volumétrica del 20 % obtenidos mediante impresión 3D, disminuyeron con respecto al material matriz, su posible causa estaría motivada por la falta de un estudio previo en la compatibilidad de los materiales empleados.

Las disminuciones de ciertas propiedades mecánicas en los materiales compuestos fabricados mediante fabricación aditiva con respecto a las propiedades del material matriz se debieron al bajo nivel adherencia que tuvieron las fibras refuerzo con el material matriz, es decir, se generó una pobre interfaz entre los mencionados elementos constitutivos.

El módulo de elasticidad de los materiales compuestos reforzados analizados aumentó con respecto al material matriz, lo que se traduce en un aumento de la rigidez de los materiales caracterizados.

Los materiales compuestos fabricados mediante impresión 3D, son una alternativa para la fabricación de autopartes, debido a que sus características mecánicas en algunos casos son superiores a otros materiales considerados en la industria automotriz.

La simulación computacional de las rejillas de aire acondicionado sometidas a una carga, permite verificar las diferencias significativas que existe entre estos dos materiales analizados en cuanto al desplazamiento nodal, además, permitió verificar que en el análisis de esfuerzo no existe una diferencia significativa entre los materiales simulados.

Referencias

[1] A. K. Bledzki, O. Faruk, and V. E. Sperber, "Cars from bio-fibres," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 291, no. 5, pp. 449–457, 2006. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/mame.200600113

[2] K. Quesada-Solís, P. Alvarado-Aguilar, R. Sibaja-Ballestero, and J. Vega-Baudrit, "Utilización de las fibras del rastrojo de piña (*Ananas comusus*, variedad *champaka*) como material de refuerzo en resinas de poliéster," *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 6, no. 2, pp. 157–179, 2005. [Online]. Available: http://bit.ly/2J8ddTT

[3] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Progress report on natural fiber reinforced composites," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 299, no. 1, pp. 9–26, 2014. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/mame.201300008

[4] F. Ahmad, H. S. Choi, and M. K. Park, "A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 300, no. 1, pp. 10–24, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1002/mame.201400089

[5] K. N. Roshdestwensky, J. L. Mroginski, C. A. Morel, R. B. D'Ambra, and J. M. Podestá, "Modelado numérico del comportamiento de la interface en materiales compuestos," *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. 32, no. 19, pp. 1653–1670, 2013. [Online]. Available: http://bit.ly/2KEWMSr

[6] N. Guo and M. C. Leu, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, 2013. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8

[7] P. C. Li and S. C. Huang, "Application of rapid prototyping technology in automobile manufacturing industry," in *Modern Tendencies in Engineering Sciences*, ser. Applied Mechanics and Materials, vol. 533. Trans Tech Publications Ltd, 5 2014, pp. 106–110. [Online]. Available: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.533.106

[8] M. Berchon and B. Luyt, *La impresión 3D. Guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general.* Editorial Gustavo Gili, 2016. [Online]. Available: http://bit.ly/2YcsNEp

[9] J. Bonada, A. Muguruza, X. Fernández-Francos, and X. Ramis, "Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive materials used in additive manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 762–769, 2017. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.182

[10] Stratasys. (2017) Make it more realistic and accurate with polyjet. Stratasys Ltd. [Online]. Available: http://bit.ly/31VRQhq

[11] W. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* Editorial Reverté. S. A., 2007. [Online]. Available: http://bit.ly/2XuZ4JF

[12] P. Pontón and V. H. Guerrero, "Obtención de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de abacá mediante estratificación manual," *Revista Tecnológica ESPOL*, vol. 23, no. 3, pp. 47–54, 2010. [Online]. Available: http://bit.ly/2ZLLPSw

[13] J. G. Paredes Salinas and A. D. Jácome León, *Estudio de la configuración de fibras del material compuesto de matriz epoxi reforzada con fibra de piña y su incidencia en las propiedades mecánicas en la fabricación de butacas deportivas.* Tesis de Grado, Universdad Técnica de Ambato, 2015. [Online]. Available: http://bit.ly/2X0ZKCf

[14] J. Summerscales, A. S. Virk, and W. Hall, "Enhanced rules-of-mixture for natural fibre reinforced polymer matrix (nfrp) composites (comment on lau et al. in volume 136)," *Composites Part B: Engineering*, vol. 160, pp. 167–169, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.021

[15] D. S. Ponce and V. Guerrero, "Propiedades mecánicas de compuestos biodegradables elaborados a basa de ácido poliláctico reforzados con fibra de abacá," *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 2, 2014. [Online]. Available: http://bit.ly/2X12KhZ

[16] J. C. Rocha-Hoyos, E. A. Llanes-Cedeño, S. F. Celi-Ortega, and D. C. Peralta-Zurita, "Efecto de la Adición de Biodiésel en el Rendimiento y la Opacidad de un Motor Diésel," *Información tecnológica*, vol. 30, pp. 137–146, 06 2019. [Online]. Available: http://bit.ly/2XzptpO

[17] N. A. Tamayo Duque, *Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster Reforzados con Fibra de Cabuya Mediante Estratificación.* Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 2012. [Online]. Available: http://bit.ly/2NnLNPA